

Treball de Fi de Màster

## **Màster Universitari en Enginyeria Industrial**

### **Estudi i gestió de microxarxes**

#### **MEMÒRIA**

**Autor:** Miguel Bárcena González  
**Directora:** Mònica Aragüés Peñalba  
**Co-Director:** Eduard Bullich Massagué  
**Convocatòria:** Juny, 2018



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



# Resum

El present treball de fi de màster presenta una eina per analitzar la viabilitat econòmica d'un projecte d'integració d'energies renovables en sistemes de baixa potència, transformant instal·lacions elèctriques en microxarxes.

El dimensionat òptim de la instal·lació s'obté realitzant un anàlisi horari de la generació renovable, l'estat de la bateria i el consum elèctric de l'edifici durant un any. El model contempla els principals components d'una microxarxa per garantir el màxim retorn econòmic al final del projecte, estipulat en 20 anys. S'estudien dos escenaris: una instal·lació fotovoltaica sense emmagatzematge i un projecte amb fotovoltaica, mini eòlica i emmagatzematge distribuït.

Els estudis es realitzen en 5 equipaments municipals de Martorelles, municipi que ha col·laborat amb el projecte i ha facilitat l'accés a dades de consum elèctric. L'optimització i el dimensionat es realitza amb el programari GAMS.



# Índex

<b>Abstract</b>	<b>1</b>
<b>1 Introducció</b>	<b>13</b>
1.1 Introducció . . . . .	13
1.2 Hipòtesi . . . . .	14
1.3 Objectius del projecte . . . . .	14
1.4 Abast del projecte . . . . .	14
<b>2 Estat de l'art</b>	<b>17</b>
2.1 Generació distribuïda . . . . .	17
2.1.1 Generació Solar Fotovoltàica . . . . .	18
2.1.2 Energia Eòlica . . . . .	20
2.2 Sistemes d'emmagatzematge . . . . .	21
2.2.1 Tipologia de Bateria . . . . .	22
2.2.1.1 Bateria Àcid-plom . . . . .	23
2.2.1.2 Bateria de Níquel-Cadmi $Ni - Cd$ . . . . .	23
2.2.1.3 Bateria de Sulfur de Sodi $NaS$ . . . . .	23
2.2.1.4 Bateria Ió-Liti . . . . .	23
2.3 Electrònica de Potència . . . . .	23
<b>3 Modelització d'una microxarxa</b>	<b>25</b>
3.1 Modelització generació PV . . . . .	26
3.1.1 Mòduls fotovoltaics . . . . .	28
3.2 Modelització generació eòlica . . . . .	29
3.3 Modelització de l'emmagatzematge . . . . .	31
3.3.1 Modelització bateria àcid-plom . . . . .	32
3.3.2 Modelització bateria ió-liti . . . . .	33
3.4 Modelització de l'electrònica de potència . . . . .	33



3.4.1	Modelització inversor híbrid . . . . .	34
3.4.2	Modelització inversor de connexió xarxa . . . . .	35
3.5	Modelització de la xarxa elèctrica . . . . .	36
3.5.1	Tarifa 2.0 . . . . .	36
3.5.2	Tarifa 2.1 . . . . .	37
3.6	Modelització del consum . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Formulació matemàtica per optimitzar el dimensionat d'una microxarxa</b>	<b>39</b>
4.1	Funció objectiu . . . . .	39
4.2	Conjunts . . . . .	39
4.3	Variables . . . . .	40
4.4	Paràmetres . . . . .	41
4.5	Restriccions . . . . .	42
4.6	Solvers . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Cas d'estudi</b>	<b>47</b>
5.1	Introducció al cas d'estudi . . . . .	47
5.2	Ajuntament . . . . .	49
5.2.1	Dimensionat òptim d'una microxarxa sense bateries. Model PV Ajuntament . . . . .	51
5.2.1.1	Cost de la instal·lació sense bateries . . . . .	52
5.2.1.2	Operació de la microxarxa sense bateries . . . . .	53
5.2.2	Dimensionat òptim d'una microxarxa amb bateries. Model Microgrid Ajuntament . . . . .	54
5.2.2.1	Cost de la instal·lació amb bateries . . . . .	56
5.2.2.2	Operació de la microxarxa amb bateries . . . . .	56
5.3	Centre de Salut . . . . .	59
5.3.1	Dimensionat òptim d'una microxarxa sense bateries. Model PV Centre Salut . . . . .	60
5.3.1.1	Cost de la instal·lació sense bateries . . . . .	61
5.3.1.2	Operació de la microxarxa sense bateries . . . . .	62
5.3.2	Dimensionat òptim d'una microxarxa amb bateries. Model Microgrid Centre de Salut . . . . .	64
5.3.2.1	Cost de la instal·lació amb bateries . . . . .	65
5.3.2.2	Operació de la microxarxa amb bateries . . . . .	65
5.4	Conclusions del Cas d'estudi . . . . .	67
	<b>Conclusions</b>	<b>69</b>
	Treball Futur . . . . .	69

<b>Agraïments</b>	<b>71</b>
<b>A Estudi microxarxa sense emmagatzematge: Model PV</b>	<b>73</b>
A.1 Local de la Brigada . . . . .	73
A.2 Casal d'Avis . . . . .	74
A.3 Local Central . . . . .	76
A.4 Conclusions projecte fotovoltaica . . . . .	77
<b>B Anàlisi de sensibilitat del cost de les bateries al Centre de Salut</b>	<b>79</b>
B.1 Anàlisi per una Tarifa sense discriminació horària . . . . .	79
B.2 Anàlisi per una Tarifa sense discriminació horària . . . . .	80
B.3 Conclusions de l'anàlisi . . . . .	81
<b>C Pressupost</b>	<b>83</b>
C.1 Pressupost del maquinari . . . . .	83
C.2 Pressupost del programari . . . . .	83
C.3 Pressupost de mà d'obra . . . . .	83
C.4 Pressupost total del projecte . . . . .	84
<b>D Impacte Ambiental</b>	<b>85</b>
<b>Bibliography</b>	<b>88</b>



# Índex de figures

1.1	Models de distribució elèctrica . . . . .	13
2.1	Criteris per definir la generació distribuïda . . . . .	18
2.2	Evolució de les inversions en energies renovables . . . . .	19
2.3	Fonts de generació renovable . . . . .	19
2.4	Evolució de la capacitat PV instal·lada . . . . .	20
2.5	Evolució del cost d'un panell PV a Europa . . . . .	20
2.6	Capacitat eòlica total a la Unió Europea 2005-2017 . . . . .	21
3.1	Esquema de la microxarxa desenvolupada . . . . .	25
3.2	Bases de dades consultades per introduir la irradiació solar a Martorelles . . . . .	26
3.3	Comparativa irradiació solar PVGIS-meteo.cat . . . . .	27
3.4	Mapa zona vallès-maresme . . . . .	27
3.5	Panell AS-6P Amerisolar . . . . .	28
3.6	Corba de potència elèctrica dels aerogeneradors estudiats . . . . .	29
3.7	Generació anual d'un aerogenerador Enair 30 a Martorelles . . . . .	30
3.8	Generació horària Enair 30 a Martorelles durant el mes de Gener del 2016 . . . . .	30
3.9	Operació de bateria amb $SOC(t)=1000Wh$ . . . . .	31
3.10	Bateria UPower 6V . . . . .	32
3.11	Modelització Bateria Ió-Liti . . . . .	33
3.12	Inversors híbrids . . . . .	35
3.13	Inversors de connexió a xarxa . . . . .	36
5.1	Model PV sense bateries . . . . .	48
5.2	Model microxarxa amb bateries . . . . .	49
5.3	Ajuntament de Martorelles . . . . .	50
5.4	Consum de l'Ajuntament durant la segona setmana de Juliol . . . . .	50
5.5	Consum elèctric any 2017 . . . . .	51

5.6	Evolució Cash Flow acumulat: PV Ajuntament . . . . .	52
5.7	Percentatge d'energia verda consumida: PV Ajuntament. Esquerra - Tarifa 2.0A. Dreta - Tarifa 2.0DHA . . . . .	52
5.8	Distribució del cost a la inversió inicial: PV Ajuntament . . . . .	53
5.9	Operació anual: PV Ajuntament . . . . .	53
5.10	Operació segona setmana de Febrer: PV Ajuntament . . . . .	54
5.11	Operació segona setmana de Juliol: PV Ajuntament . . . . .	54
5.12	Evolució Cash Flow acumulat: Microgrid Ajuntament . . . . .	55
5.13	Percentatge d'energia renovable consumida: Microgrid Ajuntament. Esquerra - Tarifa 2.0A. Dreta - Tarifa 2.0DHA . . . . .	56
5.14	Distribució del cost a la inversió inicial: Microgrid Ajuntament . . . . .	56
5.15	Operació anual tarifa 2.0A: Microgrid Ajuntament . . . . .	57
5.16	Operació segona setmana de Febrer tarifa 2.0A: Microgrid Ajuntament . . . . .	57
5.17	Operació segona setmana de Juliol tarifa 2.0A: Microgrid Ajuntament . . . . .	58
5.18	Operació anual tarifa 2.0DHA: Microgrid Ajuntament . . . . .	58
5.19	Operació segona setmana de Febrer tarifa 2.0DHA: Microgrid Ajuntament . . . . .	59
5.20	Operació segona setmana de Juliol tarifa 2.0DHA: Microgrid Ajuntament . . . . .	59
5.21	Centre de Salut de Martorelles . . . . .	60
5.22	Evolució Cash Flow acumulat i percentatge d'energia fotovoltaica: PV Centre Salut . . . . .	61
5.23	Distribució del cost a la inversió inicial: PV Centre Salut . . . . .	62
5.24	Operació anual: PV Centre de Salut . . . . .	62
5.25	Operació segona setmana de Febrer: PV Centre de Salut . . . . .	63
5.26	Operació segona setmana de Juliol: PV Centre de Salut . . . . .	63
5.27	Evolució Cash Flow acumulat: Microgrid Centre de Salut . . . . .	64
5.28	Percentatge d'energia renovable consumida: Microgrid Centre de Salut. Esquerra - Tarifa 2.1A. Dreta - Tarifa 2.1DHA . . . . .	65
5.29	Distribució del cost a la inversió inicial: Microgrid Centre de Salut . . . . .	65
5.30	Operació anual tarifa 2.1A: Microgrid Centre de Salut . . . . .	66
5.31	Operació segona setmana de Febrer tarifa 2.1A: Microgrid Centre de Salut . . . . .	66
5.32	Operació segona setmana de Juliol tarifa 2.1A: Microgrid Centre de Salut . . . . .	67
A.1	Resultats model PV: Local Brigada . . . . .	74
A.2	Resultats model PV: Casal d'Avis . . . . .	75
A.3	Resultats model PV: Local Central . . . . .	77
B.1	Evolució Cash Flow acumulat: Anàlisi del cost de les bateries amb Tarifa 2.1A al Centre de Salut . . . . .	80

B.2 Evolució Cash Flow acumulat: Anàlisi del cost de les bateries amb Tarifa	
2.1DHA al Centre de Salut . . . . .	81



# Índex de taules

3.1	Característiques tècniques Enair 30Pro i Nemo 2000 . . . . .	29
3.2	Tarifa 2.0 . . . . .	36
3.3	Períodes de DHA . . . . .	37
3.4	Tarifa 2.1 . . . . .	37
4.1	Conjunts temporals . . . . .	40
4.2	Variables del model . . . . .	40
4.3	Variables Positives . . . . .	40
4.4	Variables Enteres . . . . .	41
4.5	Variables binàries . . . . .	41
4.6	Paràmetres . . . . .	41
4.7	Inputs del model . . . . .	41
4.8	Anàlisi comparatiu dels solvers lliures . . . . .	45
5.1	Resultats Ajuntament . . . . .	51
5.2	Resultats Microgrid Ajuntament . . . . .	55
5.3	Resultats Centre de Salut . . . . .	60
5.4	Resultats Microgrid Centre Salut . . . . .	64
A.1	Resultats model PV: Local Brigada . . . . .	73
A.2	Resultats model PV: Casal d'Avis . . . . .	75
A.3	Resultats model PV: Local Central . . . . .	76
B.1	Anàlisi del cost de les bateries Centre Salut 2.1A . . . . .	79
B.2	Anàlisi del cost de les bateries Centre Salut 2.1DHA . . . . .	80
C.1	Pressupost del maquinari . . . . .	83
C.2	Pressupost del programari . . . . .	83
C.3	Pressupost de ma d'obra . . . . .	84



C.4 Pressupost total del projecte . . . . .	84
---	----

# Capítol 1

## Introducció

### 1.1 Introducció

La tecnologia incideix de forma directa en la realitat material de les persones i la seva inclusió evoluciona de forma exponencial. Avui en dia resulta impossible, al món occidental, deslligar la vida diària de mòbils, cotxes, rentadores, ordinadors, routers... S'ha desenvolupat una societat tecnològicament depenent i, per tant, parasitària d'energia.

El model energètic, vigent des del segle XX, sustenta aquest desenfrenat ritme de vida; és el responsable de satisfer el constant augment de la demanda energètica. Les mesures adoptades fins el moment (sobredimensionament d'infraestructures, plantes de generació basades en combustibles fòssils, etc) provoquen emissions de gasos i partícules contaminants, principals instigadors de multitud de malalties respiratòries, de l'escalfament global i, en conseqüència, del canvi climàtic [1, 2].

La transició cap un model energètic que redueixi la dependència dels combustibles fòssils ha estat la solució adoptada per investigadors, associacions i entitats polítiques nacionals i internacionals [3, 4]. L'electricitat haurà de ser la força motriu que doni empenta a la societat del futur. Deslligar la generació elèctrica dels combustibles fòssils és el gran repte del model energètic per aquest segle.

Font: REE

Font: IEEE

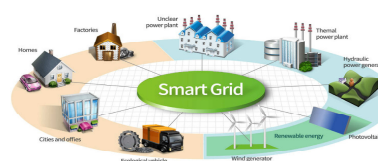
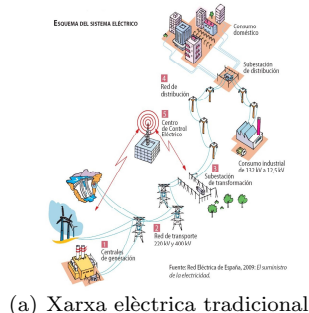


Figura 1.1: Models de distribució elèctrica

La substitució de centrals de carbó i cicle combinat per fonts d'energia renovable i l'electricificació de la demanda (vehícle elèctric, sistemes de refrigeració i climatització elèctrics, etc) permeten albirar un model energètic més sostenible. Altrament, un nou model de distribució

elèctric serà necessari per integrar els nous models de generació i consum. Aquest model descentralitzat, participatiu i horitzontal, es concreta en el concepte de *smart grid* o xarxa intel·ligent.

La xarxa elèctrica tradicional, com es mostra a la *Figura 1.1*, es considera una xarxa passiva: l'electricitat es genera en grans quantitats a les diferents centrals del territori, es transporta als nuclis urbans i es distribueix entre els consumidors. Aquest model confronta amb la integració de les energies renovables i no és capaç de treure rendiment a l'augment de càrregues flexibles o sistemes d'emmagatzematge. [5]

La nova xarxa elèctrica, com es mostra la *Figura 1.1*, neix per subsanar aquestes mancances. Els avenços en l'electrònica de potència, les fonts d'energia renovables distribuïdes i els sistemes d'emmagatzematge permeten visualitzar una futura xarxa intel·ligent on, sobre la xarxa elèctrica tradicional, sorgeixen multitud de microxarxes acoplades a la mateixa. [6]

## 1.2 Hipòtesi

El present treball pretén facilitar la integració de microxarxes aportant un anàlisi energètic que permeti maximitzar el retorn econòmic del projecte. Per fer-ho, es realitza un estudi anual amb discriminació horària que permet analitzar perfils de consum individualitzats, introduir bateries i aerogeneradors. Aquesta tesi vol evaluar si, com a consumidor, es rendible econòmicament apostar per les microxarxes.

## 1.3 Objectius del projecte

Els objectius que s'estableixen en aquesta tesi són els següents:

- Desenvolupar una eina que faciliti la realització de projectes d'origen renovable.
  - Modelar el comportament d'una microxarxa.
  - Calcular el dimensionat òptim d'una microxarxa a partir de la corba de consum horari.
  - Analitzar l'impacte econòmic d'un projecte d'integració renovable.
- Aplicar l'eina desenvolupada en un escenari real.
  - Presentar un projecte d'integració d'energies renovables al municipi de Martorelles.
  - Utilitzar dades de costs, de generació i de consum reals.
- Provar la viabilitat econòmica de les energies renovables.
  - Estimar el retorn econòmic d'instal·lacions fotovoltaïques per diferents equipaments.
  - Estudiar la integració de les bateries en sistemes d'autoconsum.

## 1.4 Abast del projecte

Aquesta tesi inclou l'anàlisi, la modelització i simulació d'una microxarxa en 5 equipaments del municipi de Martorelles. La construcció del model és la principal contribució de l'estudi, realitzat en GAMS.

El treball realitzat recull el dimensionat de microxarxes connectades a la xarxa de distribució amb potències contractades inferiors a 15 kW, que es corresponen amb tarifes d'accés 2.0 i

2.1 segons la legislació espanyola. Les fonts de generació incloses en el model són la solar fotovoltaica i la minieòlica. Per altra banda s'ha estudiat la introducció de bateries de liti i plom.

El model desenvolupat recull el cost dels components principals de la microxarxa i el cost de l'electricitat corresponents al preu de mercat durant la realització del document.

En aquesta tesi s'ha tingut en compte la normativa vigent que no permet la venda d'energia sobrant a la xarxa. Per altra banda, no s'ha contemplat una variació en el preu de l'energia ni en el comportament del consumidor per avaluar el retorn econòmic del projecte.



## Capítol 2

# Estat de l'art

Es defineix una microxarxa com un grup interconnectat de càrregues i fonts d'energia distribuïda que actuen com a una única entitat davant la xarxa i que poden operar connectats a la mateixa o en mode illa [7]. D'aquesta forma es permet integrar fonts d'energia renovable distribuïda, aprofitar la flexibilitat de les càrregues per millorar el rendiment del sistema i mantenir el control de la xarxa.

### 2.1 Generació distribuïda

El concepte de fonts de generació distribuïda ha estat discutit arreu. S'han establert diferents criteris en funció, principalment, de la localització o de la capacitat de la instal·lació. La definició més genèrica i ampliament acceptada va ser dictada per Ackerman [8]:

*Distributed generation is an electric power source connected directly to the distribution network or on the customer site of the meter.*

Ackerman estableix el criteri en funció de la localització del generador, considerant com a distribuïda tota la generació connectada a la xarxa de distribució o a la pròpia xarxa del consumidor, deixant de banda tots aquells generadors connectats a la xarxa de transport. En quant a la capacitat, s'estableix un criteri en funció de la potència instal·lada:

- Micro distributed generation  $\sim 1 \text{ W} - 5 \text{ kW}$
- Small distributed generation  $5 \text{ kW} - 5 \text{ MW}$
- Medium distributed generation  $5 \text{ MW} - 50 \text{ MW}$
- Large distributed generation  $50 \text{ MW} - \sim 30 \text{ 0MW}$

Altres autors i articles [9, 10] estableixen diferents criteris per catalogar la generació distribuïda, esquematitzats a la *Figura 2.1*, que ens seran útils per restringir i clarificar els sistemes necessaris pel desenvolupament de la tesi.

La idiosincràsia del projecte delimita la generació distribuïda a fonts d'energia renovables de potències inferiors a 5 MW i connectades a la xarxa de distribució. La propietat recaurà sobre el consumidor i es considerarà únicament la generació de potència activa.

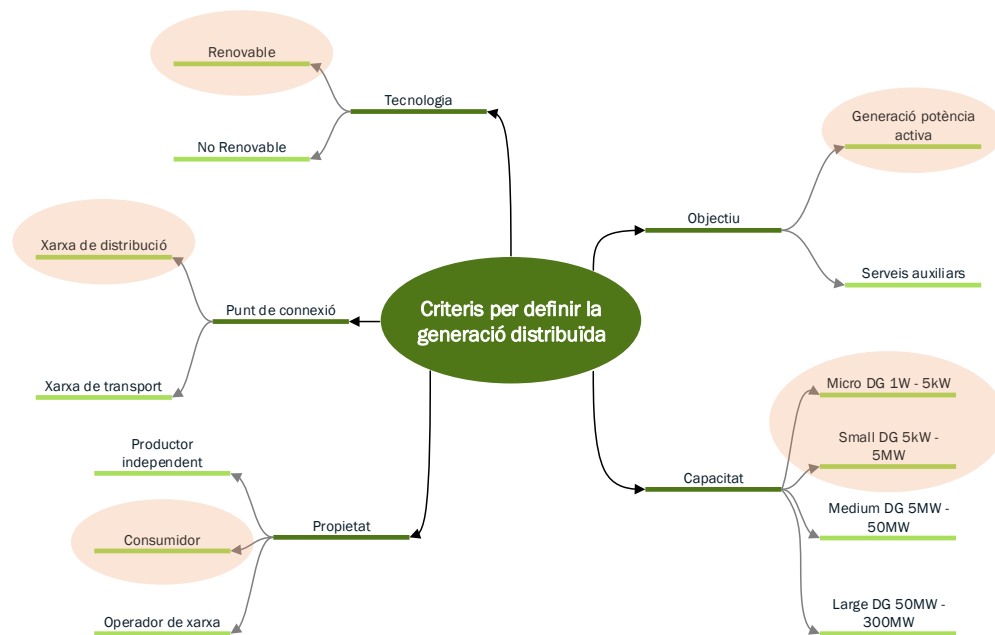


Figura 2.1: Criteris per definir la generació distribuïda

## Generació Renewable

Des de finals del segle XX l'escalfament global ha esdevingut una preocupació social majoritària. Altrament, els jaciments de combustibles fòssils continuent minvat el que provoca un augment en el preu dels mateixos. Com a conseqüència, la inversió en fonts de generació alternatives ha crescut exponencialment els darrers anys[11], com es pot observar a la *Figura 2.2*.

Les tecnologies renovables es poden referenciar a la seva font d'origen, com podem observar a la *Figura 2.3*. Aquesta tesi estudiarà únicament 2 fonts d'origen renovable:

- Solar fotovoltaica (PV)
- Mini eòlica

S'han descartat la resta d'opcions renovables degut a incompatibilitats geogràfiques i/o tècniques.

La producció d'electricitat amb biomassa no compleix el requisit de zero emissions i la tecnologia solar tèrmica no és viable econòmicament dins el rang de potències estudiades. Per altra banda, la situació geogràfica de Martorelles fa impossible l'explotació hidràulica, maremotriu o geotèrmica com a fonts d'energia elèctrica.

### 2.1.1 Generació Solar Fotovoltaica

L'energia solar és una font clarament renovable i inesgotable. La superfície terrestre rep 50.000 TW de potència solar, és a dir, l'energia solar diària que arriba a la Terra és, aproximadament, l'energia consumida a tot el món durant 7 anys [12].

**Global New Investment in Renewable Power and Fuels, Developed, Emerging and Developing Countries, 2005–2015**

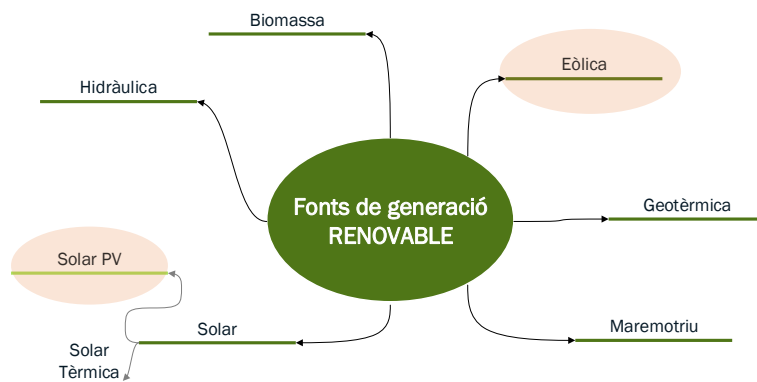


REN21 *Renewables 2016 Global Status Report*



**Figura 2.2: Evolució de les inversions en energies renovables**

Font: REN21



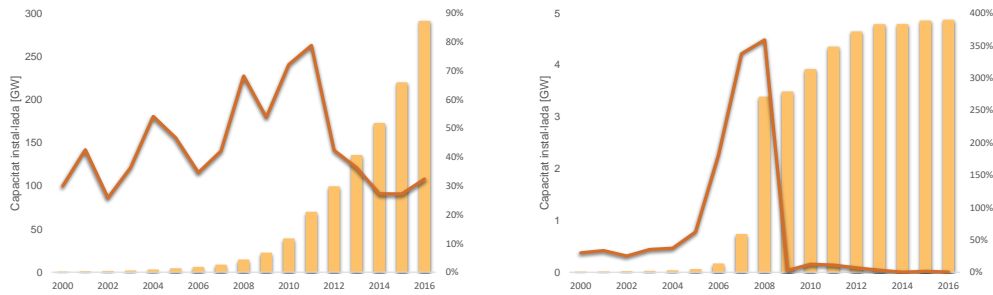
**Figura 2.3: Fonts de generació renovable**

Entre les diferents tecnologies renovables, la fotovoltaica és prometedora degut al seu mínim cost de producció [13], el combustible està lliure de taxes i els requisits de manteniment són mínims. A més és una tecnologia altament provada, la instal·lació és senzilla i no genera grans impactes; ni visuals ni acústics.

A la *Figura 2.4* s'observa l'evolució de la presència fotovoltaica al món i a l'Estat Espanyol.

La potència fotovoltaica creix exponencialment a nivell mundial, l'increment interanual no ha baixat mai del 25%. L'evolució dels darrers anys no és comparable al període 2008-2012, on l'increment anual mig va ser del 70%, tot i així, és innegable que el sector fotovoltaic és





(a) Capacitat solar PV instal·lada al món

(b) Capacitat solar PV instal·lada a l'Estat

Figura 2.4: Evolució de la capacitat PV instal·lada

un sector en creixement.

El panorama fotovoltaic a l'Estat Espanyol és molt particular, l'any 2008 es va instal·lar el 44% de la potència PV mundial. Durant els anys 2007 i 2008 l'increment interanual superava el 300%. Una previsió governamental desastrosa i l'inici de la crisi econòmica van precipitar la fi de la bombolla fotovoltaica. Com a conseqüència multitud de petits inversors van quedar arruïnats, moltes instal·lacions van quedar en desús per manca de manteniment i, finalment, el gruix la societat espanyola va donar-li l'esquena al món fotovoltaic [14][15][16].

Després de 10 anys sense grans inversions en el sector es preveu un retorn de les inversions fotovoltaiques a l'Estat espanyol. La producció d'escala ha provocat una reducció en el cost dels panells fotovoltaics *Figura 2.5* i fa cada vegada més proper un futur renovable.

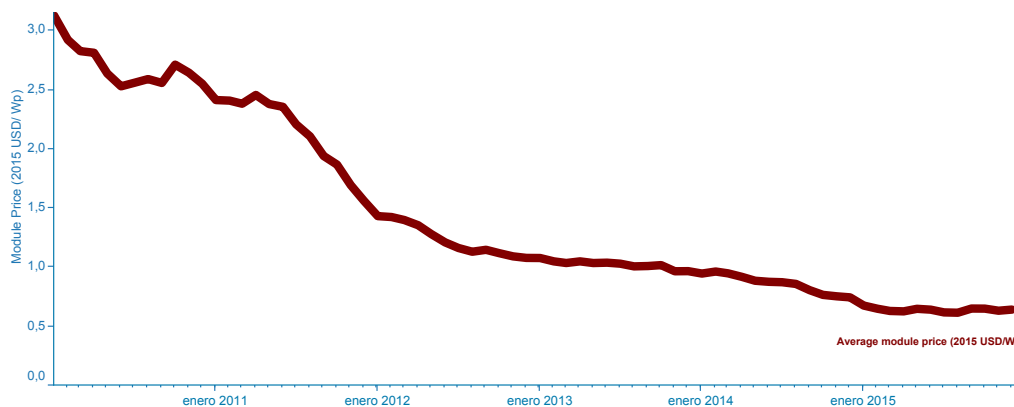


Figura 2.5: Evolució del cost d'un panell PV a Europa

Font: IRENA

L'eina desenvolupada en aquesta tesi pretén evaluar la viabilitat d'aquestes inversions.

### 2.1.2 Energia Eòlica

El recurs eòlic ha estat font de vida per multitud de cultures al llarg de la història, ha estat motor d'infinat de vaixells i molins per moldre gra o bombejar aigua. A l'actualitat la

força del vent és capaç de moure un aerogenerador per produir 8 MW de potència elèctrica, és a dir, per cobrir la necessitat energètica de 2.000 habitatges a l'estat.

L'energia eòlica ha estat la font d'energia renovable que ha tingut un impacte més important en el mercat elèctric [17]. L'any 1981 els primers aerogeneradors s'instal·laven a Dinamarca i als Estats Units, 20 anys més tard hi haurien 24 GW instal·lats arreu del món. A partir d'aquest moment s'inicià un període d'or per l'energia eòlica, que veuria com s'incrementaven exponencialment el seu impacte al món. A la *Figura 2.6* observem l'evolució de l'energia eòlica a Europa, l'any 2017 es situa com la segona font d'energia amb més capacitat instal·lada (18%).

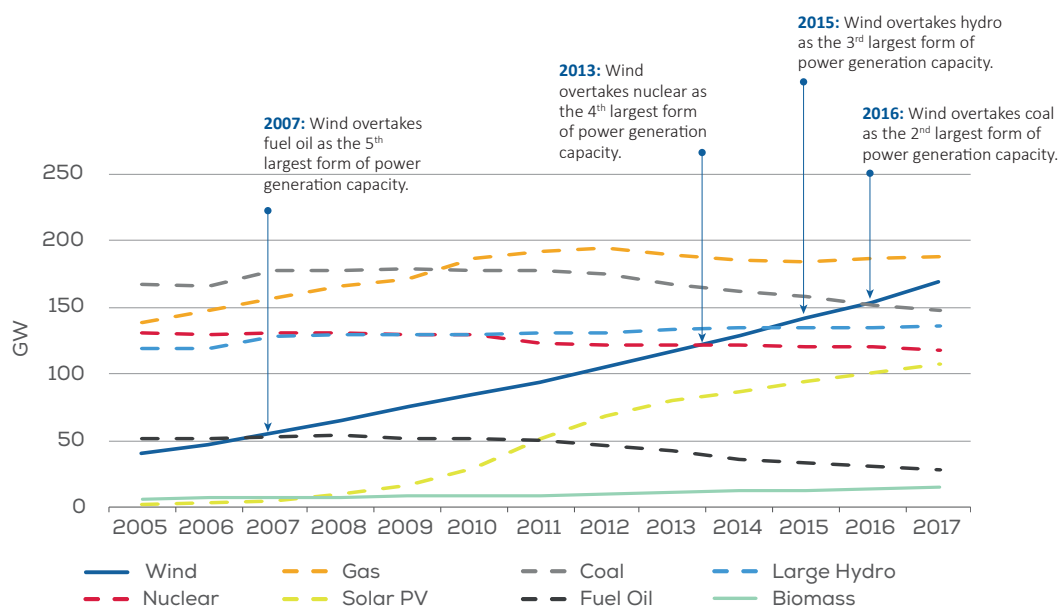


Figura 2.6: Capacitat eòlica total a la Unió Europea 2005-2017

Font: WindEurope

L'Estat Espanyol va ser un dels estats europeus amb més iniciativa envers l'energia eòlica. L'any 2015 representava més d'un 20% de la potència nacional instal·lada generant 48.000 GWh, un 18% del total. Durant els anys de bonança econòmica el govern va incentivar el sector renovable; l'any 2008 el 14% de la potència instal·lada al món es situava a l'Estat Espanyol. Seguint un esquema molt similar que amb l'energia solar, la crisi i el nou govern van suposar un fre a les inversions; des de l'any 2011, la potència eòlica a l'estat espanyol ha crescut un 7%, l'increment global, un 126% [18].

Els grans aerogeneradors i grans parcs eòlics són necessaris per un model energètic sostenible, tot i així, l'abast d'aquest projecte ens enfoca cap aerogeneradors més petits, de 2 a 3 kW de potència. Aquests mini aerogeneradors són capaços d'aportar l'energia necessària per un vivenda. Malauradament a diferència dels grans aerogeneradors, el mercat de la mini eòlica no és tant madur i, per tant, els preus per kWh generat continuen sent elevats.

## 2.2 Sistemes d'emmagatzematge

Les energies renovables són les fonts d'energia elèctrica que més creixen globalment [12]. La penetració de l'energia eòlica en alguns països europeus es situa entorn el 20% i la

presència de l'energia solar continua creixent. La generació elèctrica d'origen renovable acostuma a ser molt erràtica, aquests fets generen grans problemes d'operació i planificació a la xarxa. Diversos autors estudien com els sistemes d'emmagatzematge poden corregir aquests comportaments [19] [20]. L'energia elèctrica és pot emmagatzemar de diferents maneres [21]:

- com a energia potencial gravitatòria a reserves d'aigua
- com aire comprimit
- com energia electroquímica a bateries
- com energia química en cel·les de combustible
- com energia cinètica en volants d'inèrcia
- com a camp magnètic en inductors
- com a camp elèctric en condensadors

Els serveis que poden oferir els diferents sistemes d'emmagatzematge son diversos:

- Retall de pics i disminució de potència contractada
- Serveis auxiliars a xarxa:
  - Control de tensió
  - Injecció de reactiva
  - Regulació de demanda
- Compra-venda d'energia
- Suport a la generació renovable

Pel desenvolupament d'aquesta tesi, centrada en el dimensionat de microxarxes òptimes pel consumidor, s'ha modelat els sistemes d'emmagatzematge per donar suport a la generació renovable i, en un futur, estudiar una possible disminució de la potència contractada. Per aquest motiu ens centrem en las tecnologies òptimes per aquests serveis, les bateries, que s'estudiaran amb més profunditat. La resta de tecnologies presentades resulten interessants per altres nivells de potència, altres serveis i/o per altres etapes del model elèctric, com la distribució o la transmissió.

### 2.2.1 Tipologia de Bateries

Les bateries són la tecnologia d'emmagatzematge més utilitzada actualment. L'energia s'emmagatzema electroquímicament en múltiples cel·les, connectades en paral·lel i/o en sèrie, per obtenir el voltatge i la capacitat desitjada. Cada cel·la conté dos elèctrodes i un electròlit, col·locats junts en un recipient sellat i connectat a una font o càrrega externa. L'electròlit permet l'intercanvi d'ions entre els dos elèctrodes; mentre que el flux d'electrons circula cap a l'exterior. Hi han diverses tecnologies de bateries que han assolit la maduresa, es presenten les més rellevants [22]:

### 2.2.1.1 Bateria Àcid-plom

Les bateries àcid-plom són les bateries més madures. L'elèctrode positiu de cada cel·la està compost per diòxid de plom  $PbO_2$ , mentre que l'elèctrode negatiu és esponja de plom  $Pb$ ; tots dos immersos en una solució diluïda d'àcid sulfúric  $H_2SO_4$ . Les reaccions redox deterioren els elèctrodes, otorgant-los un temps de vida de 1200-1800 cicles, amb una eficiència del 75-80%. A part del reduït temps de vida, el principal desavantatge de la bateria d'àcid-plom és la necessitat d'un manteniment periòdic.

### 2.2.1.2 Bateria de Níquel-Cadmi $Ni - Cd$

Els principals components de les bateries Ni-Cd són: partícules de níquel i cadmi com a materials actius dels elèctrodes i una solució alcalina aquosa com a electròlit. Les bateries Ni-Cd tenen un alt rendiment i un temps de vida aproximat de 3500 cicles, malauradament el cadmi i el níquel són metalls pesants que poden provocar greus problemes de salut. És per aquest motiu que no s'han inclòs en el model de microxarxa desenvolupat.

### 2.2.1.3 Bateria de Sulfur de Sodi $NaS$

L'ànode d'aquesta tipologia de bateries està fet de sodi  $Na$ , mentre que el càtode és de sofre  $S$ . El material que realitza la funció d'electròlit i la separació de les cel·les és l'alúmina  $Al_2O_3$  o òxid d'alumini. Tot i ser una tecnologia relativament recent, les bateries de  $NaS$  son una de les opcions més prometedores per aplicacions de gran potència. La seva presència per a sistemes de baixa potència, com el desenvolupat en aquest projecte, no ha arribat al mercat i, per tant, no s'ha inclòs en el model desenvolupat en aquesta tesi.

### 2.2.1.4 Bateria Ió-Liti

Les bateries ió-liti són àmpliament utilitzades en petits dispositius com mòbils, portàtils, etc. El funcionament de les bateries d'ió liti es basa en les reaccions electroquímiques entre els cations de liti  $Li+$  i l'ànode i el càtode. El material catòlic és, habitualment, òxid de cobalt i liti  $LiCoO_2$  mentre que l'anòlic és grafit  $C$ . L'electròlit és, normalment, un líquid orgànic no aquòs ric en sals de liti, com el  $LiClO_4$ .

La densitat energètica d'aquestes bateries és molt elevada, així com el seu rendiment, aproximadament del 95%. La vida útil de les bateries d'ió liti és situada al voltant dels 6.000 cicles de vida.

## 2.3 Electrònica de Potència

L'electrònica de potència és un dels principals valedors del nou model energètic. L'evolució d'aquesta branca de la tecnologia ha estat notable i ha permès l'acoblament de sistemes de corrent contínua i alterna minimitzant les pèrdues. La nova xarxa elèctrica ha d'operar en condicions normals i, en cas de falta, sense comprometre l'estabilitat del sistema. Aquest és un objectiu que es complica amb l'augment de la integració de fonts d'energia renovable, degut a la variabilitat i la incertesa que les caracteritza.

L'electrònica de potència està permetent transformar els sistemes elèctrics de potència clàssics en sistemes amb major controlabilitat dels fluxos de potència activa i reactiva [23].

Per tal d'analitzar els costos corresponents a l'electrònica de potència s'han revisat diferents catàlegs d'empreses com Vishay, SMA, Amerisolar, Victron, Samsung, LG o Tesla. En aquesta introspecció a través del mercat de les instal·lacions renovables per l'autoconsum, s'ha detectat una tendència a encabir tota l'electrònica de potència dins un sol dispositiu "Plug and Play". Com és un fenomen en transició, es preveu una futura volatilitat en els preus d'aquests dispositius.

S'ha observat però, que el mercat de l'autoconsum energètic distingeix diferents tipologies d'inversors en funció de les característiques de la instal·lació. Consultant diferents empreses distribuïdores de productes per l'autoconsum solar/eòlic s'ha extret un seguit de definicions que es presenten a continuació:

- Inversor aïllat. Aquest dispositiu està dissenyat per transformar la corrent contínua a corrent alterna en un sistema sense accés a la xarxa externa. Estan preparats per incorporar i gestionar tant la producció renovable com la gestió de les bateries.
- Inversor/carregador. Aquest convertidor incorpora una entrada per un grup electrògen de suport o per la xarxa externa per tal de carregar les bateries.
- Inversor 3 en 1. Són equips compactes que incorporen el regulador solar (MPPT), l'inversor aïllat i el carregador de bateries. Són equips més econòmics i fàcilment instal·lables (plug and play).
- Inversor de connexió a xarxa. Aquests equips no permeten la incorporació de bateries, estan dissenyats per sincronitzar-se amb la tensió i la freqüència de la xarxa.
- Inversors híbrids. Aquests dispositius incorporen un gestor energètic capaç de controlar l'energia d'entrada dels panells solars (MPPT), les bateries (Gestor de Càrrega) i l'entrada de la xarxa. A diferència dels inversors aïllats, incorporen una entrada per la xarxa elèctrica i prioritzen l'energia renovable o l'energia emmagatzemada a les bateries per sobre de la provinent de la xarxa, maximitzant així el consum renovable.



Al llarg d'aquest capítol es presenten les restriccions tècniques de cada element per restringir el funcionament de la microxarxa. Per obtenir un dimensionat òptim s'ha realitzat una recerca exhaustiva dels elements citats per d'integrar relacions cost-potència que permetin obtenir resultats realistes per diferents rangs de potència.

### 3.1 Modelització generació PV

Per introduir la generació fotovoltaica ha estat necessari realitzar dues recerques importants. D'entrada, és indispensable recollir dades d'irradiància locals, per estimar la generació elèctrica aportada per un panell fotovoltaic. Altrament, endinsar-se en el mercat fotovoltaic per trobar les característiques tècniques i el cost dels dispositius resulta necessari per garantir un model fiable.

#### Irradiància

La irradiància [ $W/m^2$ ] és la potència per unitat d'àrea rebuda a causa de la radiació electromagnètica provinent del Sol. És aquesta energia la que, mitjançant l'efecte fotoelèctric, és transformada en energia elèctrica als panells fotovoltaics. El rendiment econòmic d'una instal·lació fotovoltaica es veu molt afectat per la irradiació [ $Wh/m^2$ ] local, és per aquest motiu que cal estudiar els registres històrics per garantir la viabilitat de la instal·lació.

L'accés a dades solars gratuïtes no és una tasca senzilla, per dur a terme aquest projecte s'ha tingut accés a dues bases de dades diferents. Inicialment s'ha consultat el Photovoltaic Geographical Information System, PVGIS, *Figura 3.2* una eina desenvolupada per la Unió Europea que fa servir dades provinents de diferents satèl·lits per generar dades de radiació solar amb resolució horària. Amb aquesta eina s'han recollit dades de la radiació solar horària a Martorelles durant el període 2007-2016.

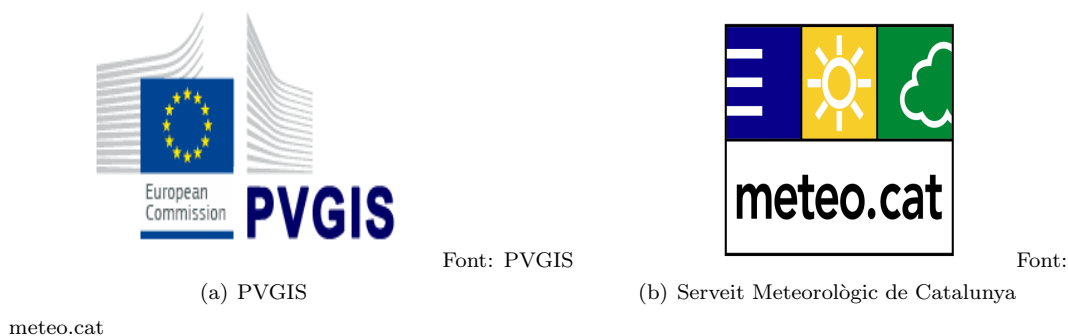


Figura 3.2: Bases de dades consultades per introduir la irradiació solar a Martorelles

L'altre base de dades consultada prové del Servei Meteorològic de Catalunya *Figura 3.2*. Atès que no hi ha cap estació ubicada a Martorelles, l'informe consultat prové de les dues estacions més properes, ubicades a Parets del Vallès i a Caldes de Montbui. Aquest informe presenta, amb resolució horària, la radiació solar i la velocitat del vent al llarg de l'any 2017.

A diferència de les dades proporcionades per la Unió Europea, les dades del Servei meteorològic de Catalunya són dades reals, mesurades per equipaments destinats a aquest fi. Malauradament, no s'han pogut confrontar directament les dues bases de dades per què no coincideixen ni en el temps, ni en l'espai. Tot i així, per valorar la idoneïtat de les dades

d'irradiació, s'ha realitzat un estudi comparatiu on s'han contrastat les dades aportades per ambdues fonts.

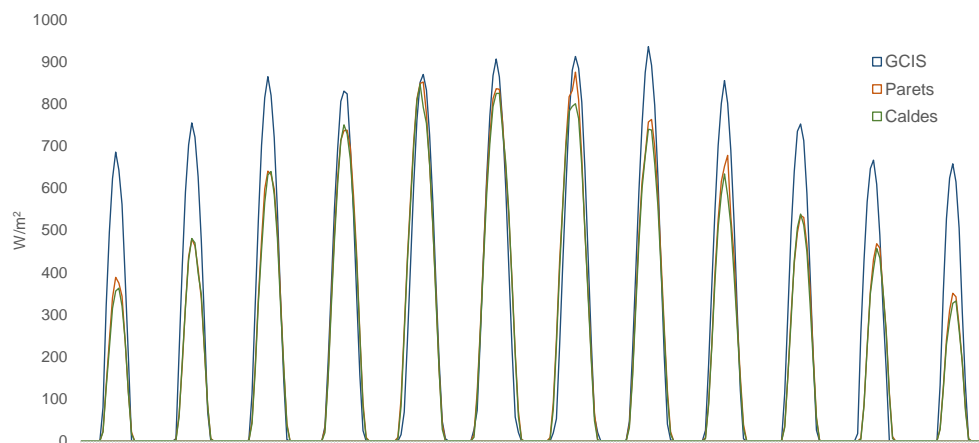


Figura 3.3: Comparativa irradiació solar PVGIS-meteo.cat

A la *Figura 3.3* s'observa la irradiació solar mitja mensual durant l'any 2017 a Caldes de Montbui, Parets del Vallès (Meteo.cat) i les modelitzades amb l'eina europea (durant el període 2007-2016) a Martorelles.

S'observa una desviació considerable entre les dades aportades per les dues institucions; les diferències, com es pot observar al gràfic, s'agregen en els mesos d'hivern on arriben a ser fins del 50%, fet que provoca una diferència en la mitjana anual d'un 16% a Parets del Vallès i d'un 20% a Caldes de Montbui.

Altrament, es pot observar que la diferència entre les mesures de Caldes i Parets són mínimes, fet que avala el seu ús pel projecte a Martorelles [3.4](#) degut a la proximitat entre els municipis.



Figura 3.4: Mapa zona vallès-maresme

Font: Google. Inst.Geogr.Nacional

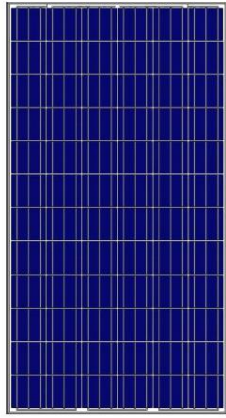


Així doncs, s'han introduït al model les dades proporcionades pel servei meteorològic de Catalunya corresponents a l'estació de Parets del Vallès degut a la proximitat d'aquesta estació amb el municipi de Martorelles.

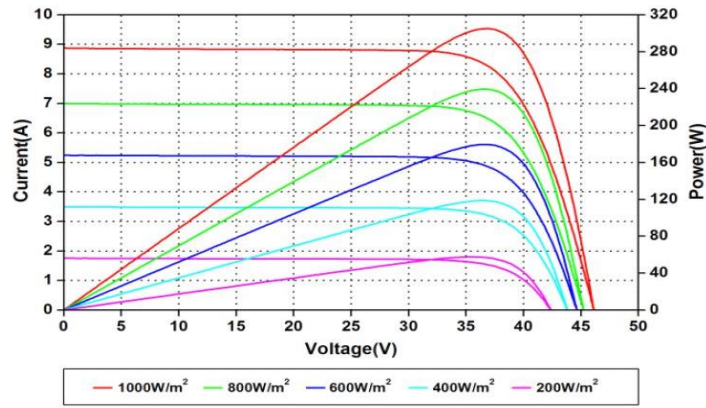
### 3.1.1 Mòduls fotovoltaics

Per caracteritzar el mòdul fotovoltaic s'ha consultat, com s'ha indicat abans, diferents distribuïdors i fabricants. Les principals diferències radiquen en la morfologia del cristall de Silici; majoritàriament però, els panells PV que s'instal·len en sistemes d'autoconsum són de tipus policristal·lí. La relació potència-cost de panells policristal·lins a les diferents marques estudiades (BOSCH, JINKO, KYOCERA, PANASONIC i AMERISOLAR) és molt similar. La vida útil dels panells és de 20 anys.

Finalment, s'ha decidit introduir el panell AS-6P *Figura 3.5*, d'Amerisolar com a model de panell fotovoltaic.



(a) Panell AS-6P, Amerisolar, 320Wp



(b) Corbes Intensitat-Tensió i Potència-Tensió per diferents radiàncies

Figura 3.5: Panell AS-6P Amerisolar

Es defineix el comportament de la generació fotovoltaica a l'equació (4.2)

$$Generacio\ PV(t) = \frac{kWpic_{PV} \cdot \rho_{PV} \cdot \rho_{Convertidor} \cdot Irradiacio(t)}{STC} \quad (3.1)$$

On  $Generacio\ PV(t)$ ,  $kWpic_{PV}$ ,  $\rho_{PV}$ ,  $\rho_{Convertidor}$ ,  $Irradiacio(t)$  es correspon amb la generació elèctrica provinent dels mòduls fotovoltaics durant el període  $t$  en  $Wh$ , els  $kWpic$  fotovoltaics òptims a instal·lar, el rendiment dels mòduls PV, l'eficiència del convertidor i la radiació solar mitja en el període  $t$ .

Sent STC els Standard Test Conditions:  $1000\ W/m^2$  a  $25\ ^\circ C$ ,  $AirMass = 1.5$ . Cal clarificar que  $\rho_{PV}$  respon a la degradació dels panells PV al llarg dels 20 anys, com figura al datasheet del model AS-6P. No s'han tingut en compte faltes en el sistema ni baixos rendiments degut a ombres, pols, etc. Per altra banda, s'ha suposat que els panells estan orientats de forma òptima.

S'ha fixat el preu actual de mercat, 245 € el panell, per definir el cost associat a la generació fotovoltaica.

## 3.2 Modelització generació eòlica

La generació eòlica s'ha introduït modelitzant 2 mini aerogeneradors concrets: L'Enair 30 Pro i el Nemo 2000. S'han triat aquests dos aerogeneradors després de realitzar un anàlisi de mercat i comprovar que són dos dels productes més valorats per rendiment i preu. Les característiques tècniques més rellevants es troben a la *taula 3.1*.

Taula 3.1: Característiques tècniques Enair 30Pro i Nemo 2000

	Enair 30 Pro	Nemo 2000
Potència Pic	2500 W	2000 W
Diàmetre rotor	3.8 m	1.76 m
Preu	7.500 €	2.000 €
Cut in	3 m/s	4.5 m/s
Cut out	20 m/s	20 m/s

A diferència del que és habitual, no s'ha fet servir la distribució de Weibull per calcular la potència extreta per l'aerogenerador. Per extreure la potència horària s'ha fet servir la corba de potència *Figura 3.6* que faciliten els fabricants i dades de vent horàries obtingudes del PVGIS.

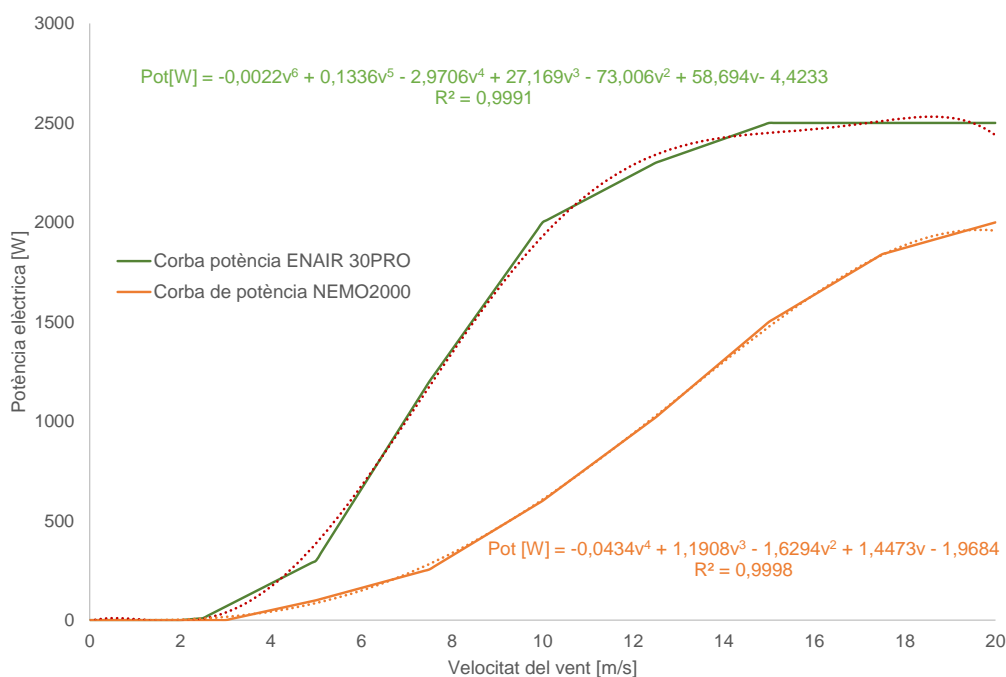


Figura 3.6: Corba de potència elèctrica dels aerogeneradors estudiats

Mitjançant EXCEL s'han caracteritzat les corbes de potència d'ambdòs aerogeneradors per obtenir els polinomis representats amb línies discontinües a la *Figura 3.6*. Gràcies a les dades obtingudes pel GCIS i el servei meteorològic de Catalunya, s'ha obtingut l'energia horària aportada per cada aerogenerador al llarg de l'any. D'aquesta manera, mantenint la linealitat, s'optimitza el nombre d'aerogeneradors de cada tipus a instal·lar. A la *Figura*

3.7 s'observa l'energia elèctrica que hagués generat l'Enair 30 durant l'any 2016, la mínima, la màxima i la mitja dels darrers 10 anys. Per encabir la generació anual dins un únic gràfic s'ha agrupat l'energia generada per més i hora. D'aquesta forma és recull l'energia generada mensualment en una corba diària, és a dir, s'observen 12 dies on cada dia correspon a cada mes de l'any. Pels estudis realitzats s'ha fet servir la generació de l'any 2016, que es correspon amb la línia vermella del gràfic.

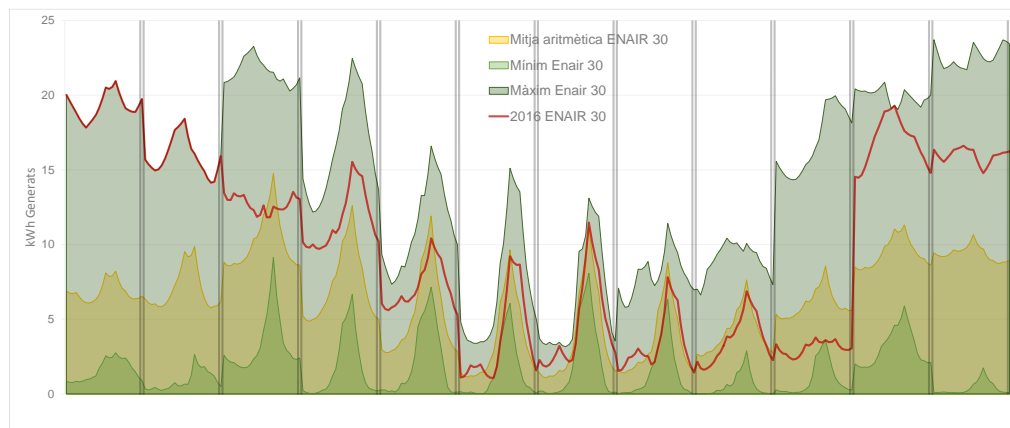


Figura 3.7: Generació anual d'un aerogenerador Enair 30 a Martorelles

Agrupar la generació eòlica pot portar a l'error. A diferència de la generació fotovoltaica, que té un comportament més uniforme, la velocitat del vent té una conducta particularment estocàstica. Observem, per exemple, el mes de Gener de l'any 2016 *Figura 3.8*.

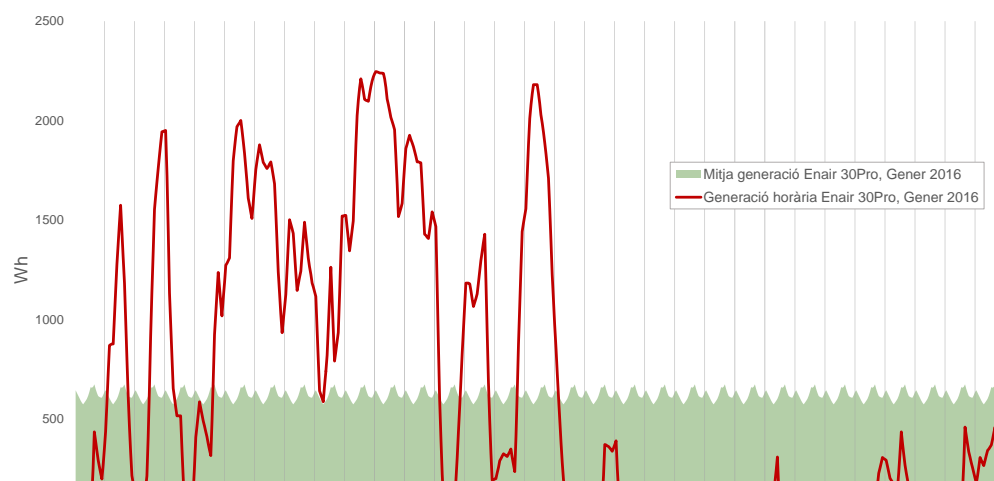


Figura 3.8: Generació horària Enair 30 a Martorelles durant el mes de Gener del 2016

Si es compara la generació eòlica horària amb la mitja mensual resulta evident que una mitjana no és la millor eina estadística per recollir les dades eòliques. És per aquest motiu que, en models on s'integrin aerogeneradors, la resolució horària (com a mínim) es necessita.

### 3.3 Modelització de l'emmagatzematge

S'han modelitzat les 2 tecnologies que tenen cabuda, actualment, en una microxarxa de baixa potència: bateries d'àcid-plom i bateries d'ió liti. Les equacions energètiques que regulen el comportament de la bateria són 6: l'equació (3.2) regula el balanç de potència a la bateria, les equacions (3.3) (3.4) i (3.5) garanteixen la linealitat de la càrrega/descàrrega de la bateria, apliquen el rendiment de la bateria i imposen el signe adequat, positiu en mode càrrega i negatiu en mode descàrrega, i les equacions (3.6) i (3.7) n'estableixen els límits de la mateixa. A la *Figura 3.9* s'esquematitza la operació de la bateria.

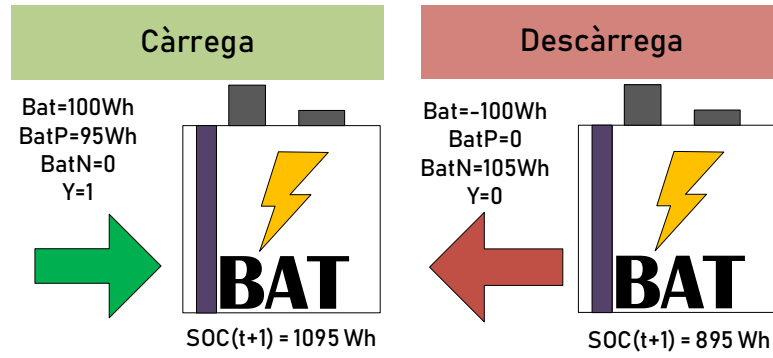


Figura 3.9: Operació de bateria amb  $SOC(t)=1000Wh$

Balanç energètic de la bateria:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + BatP(t) - BatN(t) \quad (3.2)$$

On  $SOC(t)$  és l'estat de càrrega en l'instant  $t$ ,  $SOC(t-1)$  és l'estat de càrrega en l'instant  $t-1$ .  $BatP$  i  $BatN$  són variable positives que representen l'energia que entra i que surt de la bateria, respectivament, entre els instant  $t$  i  $t-1$ .

Linealització de la càrrega i descàrrega de la bateria:

$$Bat(t) = \frac{BatP(t)}{\rho_{Carrega}} - BatN(t) \cdot \rho_{Descarrega} \quad (3.3)$$

$$BatP(t) \leq Y(t) \cdot M \quad (3.4)$$

$$BatN(t) \leq (1 - Y(t)) \cdot M \quad (3.5)$$

On  $Bat(t)$  representa l'energia que entrega la bateria, si és positiva, i l'energia que rep la bateria, si es negativa, durant el període  $t$ .  $Y(t)$  és una variable binària que tindrà valor 1 en mode càrrega i valor 0 en mode descàrrega.  $M$  representa un valor molt elevat mentre que  $\rho_{Carrega}$  i  $\rho_{Descarrega}$  escenifiquen els rendiments de càrrega i descàrrega de la bateria.

Límits de la bateria:

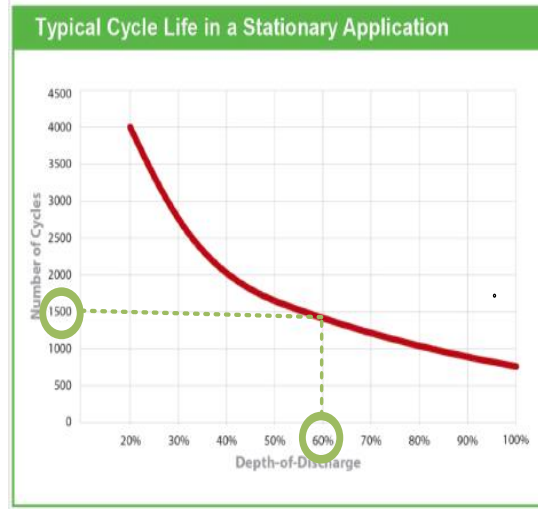
$$SOC(t) \leq SOC_{MAX} \quad (3.6)$$

$$SOC(t) \geq SOC_{min} \quad (3.7)$$

On  $SOC_{MAX}$  i  $SOC_{min}$  són l'estat de càrrega màxim i mínim de la bateria.

### 3.3.1 Modelització bateria àcid-plom

Per caracteritzar la bateria d'àcid-plom s'ha fet servir el model UP-GC16 *Figura 3.10*, de la marca U-power. Aquesta bateria és la més utilitzada per diferents companyies instal·ladors de panells fotovoltaics com Autosolar, Merkasol, Revosolar, etc. Cada bateria UPower està formada per 3 cel·les de 2 V cadascuna, és a dir, una tensió de sortida de 6 V. La capacitat de cada unitat UP-GC16 segons fabricant,  $SOC_{MAX}$ , és de 3.300 Wh. El preu d'aquest model de bateria s'ha establert en 300 € la unitat, que és el corresponent al preu de mercat durant la realització de la tesi.



(a) Bateria UP-GC16 6V

(b) Cicles de Vida en funció de la profunditat de descàrrega

Figura 3.10: Bateria UPower 6V

Gràcies al datasheet es pot identificar el nombre de cicles de vida de les bateries en funció de la profunditat de descàrrega, al model s'estima una vida útil de 5 anys. Suposant un cicle diari, comportament habitual en sistemes d'autoconsum fotovoltaic, s'estimen 1500 cicles de vida. Per garantir que la descàrrega no superi el 60%, com s'observa a la *Figura 3.10*, s'estipula una capacitat útil de 2.000 Wh; és a dir, un 60% de la capacitat total de cada bateria. És defineix, per tant, un  $SOC_{min}$  de 1300 Wh.

Per altra banda, per evitar corrents elevades que poden malmetre la instal·lació, es recomana treballar amb tensions de sortida de 24 V o 48 V, en funció del rang de potència del sistema. És per aquest motiu que en el model les bateries de plom es presenten en packs de 4 unitats. D'aquesta forma, cada pack de bateries té una capacitat màxima de 13.200 Wh, un estat de càrrega mínim de 5.200 Wh, un rendiment de càrrega/descàrrega del 80% i un cost de 1200 €/pack:

$$CostBateriaPlom = 1200 \cdot NumBat \quad (3.8)$$

Sent  $NumBat$  el nombre de packs de bateries àcid-plom òptim i  $CostBateriaPlom$  el cost de les bateries en €.

### 3.3.2 Modelització bateria ió-liti

Per caracteritzar la bateria d'ió-liti, a diferència de les bateries d'àcid-plom, s'ha establert una relació Capacitat-Cost. S'ha optat per aquest tipus de caracterització degut a l'ampli rang de capacitats presents al mercat. Extreient informació dels diferents catàlegs presentats per les comercialitzadores del sector es va extrapolar la recta que presentem a la *Figura 3.11*.

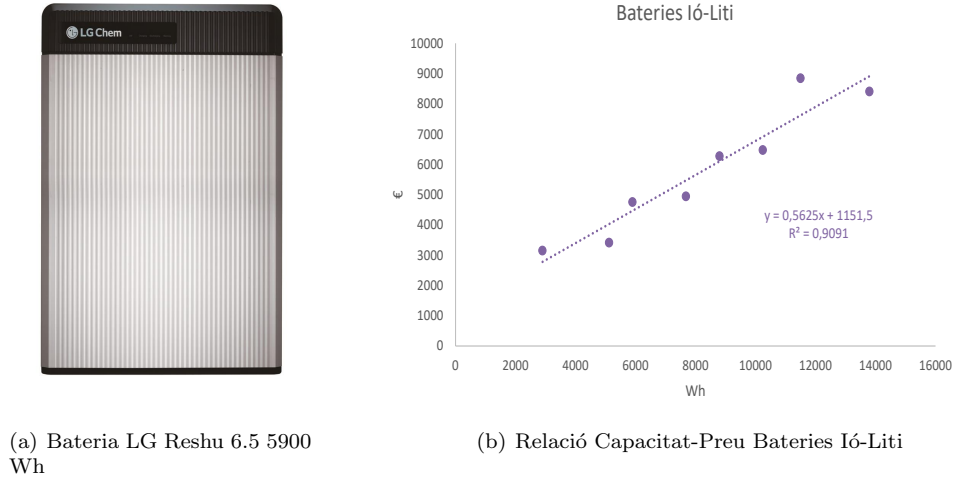


Figura 3.11: Modelització Bateria Ió-Liti

En contraposició al model fet servir per les bateries de plom, on la variable que defineix la capacitat de bateries instal·lades es de tipus enter, al model per bateries d'ió-liti és defineix la capacitat òptima de la bateria a instal·lar, és a dir, únicament es contempla la instal·lació d'una bateria i la variable a optimitzar és la capacitat d'aquesta. Els models on s'estudia la microxarxa amb bateries de liti s'ha imposat una capacitat mínima de 3000 Wh,  $SOC_{max} \leq 3000 Wh$ , que es correspon amb la capacitat mínima de les bateries d'ió-liti utilitzades actualment en instal·lacions fotovoltaïques. Per no malmetre les bateries s'ha establert un  $SOC_{min} \geq 5\% SOC_{MAX}$ .

La tensió de treball de les bateries estudiades, LG, BYD, Mercedes-Benz i Ampere, és de 48V independentment de la capacitat de la mateixa. La vida útil d'aquestes bateries és, segons fabricant, entre 6000 i 8000 cicles. Suposant un cicle diari, s'han estimat 20 anys de vida per les bateries; és a dir, la vida útil del projecte a dimensionar. El rendiment de càrrega i descàrrega s'ha fixat en 95% [22].

$$CostBateriaLiti = 0.5625 \cdot SOC_{MAX} + 1151.5 \quad (3.9)$$

Sent  $SOC_{MAX}$  la capacitat òptima de la bateria ió-liti a instal·lar i  $CostBateriaLiti$  el cost de les bateries en €.

## 3.4 Modelització de l'electrònica de potència

A l'esquema de la microxarxa *Figura 3.1* l'electrònica de potència correspon a l'àrea ombrejada en verd (element B). S'observen diferents dispositius:

- B.1 AC-to-DC converter. Aquest dispositiu converteix la corrent alterna provinent de l'aerogenerador en corrent contínua que aboca al bus DC. A l'hora regula el comportament de l'aerogenerador maximitzant l'extracció de potència dins els límits de comportament del mateix. Habitualment aquest convertidor es troba incorporat dins el propi aerogenerador.
- B.2 DC-to-DC converter. El convertidor B.2 és el responsable de garantir l'acoblament dels dos nivells de tensió, el de la fotovoltaica situat entre 24V - 120V i el bus DC que es situa entre els 400V-800V. És, a més, responsable de que el sistema fotovoltaic segueixi el MPPT, "Maxim Power Point Tracking", és a dir, garanteix el màxim aprofitament de l'energia solar. En cas que la generació superi la demanda i les bateries estiguin carregades, aquest dispositiu és l'encarregat de retallar el perfil de generació.
- B.3 DC-to-DC converter. El convertidor B.3 realitza la mateixa funció que el convertidor B.2, és el responsable de garantir l'acoblament dels dos nivells de tensió, el de la bateria situat entre 24V - 120V i el bus DC que és situat entre els 400V-800V. Per altra banda, regula el comportament de la bateria. D'aquesta forma és coneix l'estat de càrrega del sistema d'emmagatzematge i es garanteix un comportament que maximitzi els cicles de vida de la bateria. És habitual, en sistemes d'autoconsum, trobar els convertidors B.2 i B.3 incorporats en un mateix dispositiu.
- B.4 DC-to-AC converter. El convertidor B.4 és un inversor en mode *Slack* encarregat de transformar la potència del bus DC en potència AC a l'hora que manté el bus DC a la tensió de referència. La sortida del convertidor pot ser monofàsica o trifàsica i ha de garantir una tensió de 230 V i una freqüència de 50 Hz.
- B.5 Selector. El selector és l'element que en funció de la situació del sistema habilita/deshabilita la connexió a la xarxa externa. Si la càrrega  $E$  necessita més potència que la provinent de l'inversor, s'habilita la connexió amb la xarxa per garantir el compliment de la demanda. En cas que la generació fos més gran que la demanda i les bateries estiguessin completament carregades, el convertidor B.3 retallaria el perfil de generació per tal de no superar la demanda, aquesta és una solució gens òptima però necessària degut a les restriccions jurídiques presents a l'Estat Espanyol.

En el model s'ha simplificat l'electrònica de potència a un únic element, que relaciona la generació, el consum, la xarxa elèctrica i, depenent el model, les bateries. Per aquest element, capitalitzat per l'inversor, s'ha fixat una eficiència del 95%. D'acord a la literatura, el rendiment dels inversors en instal·lacions fotovoltaïques actuals es situa entre el 95-98% en funció de la potència. [24] [25]

En quant al model de costos, gràcies als catàlegs consultats, s'han definit dues rectes que relacionen la potència de l'inversor i el cost del mateix. S'han considerat únicament dos models d'inversors, aquells que estan dissenyats per treballar connectats a xarxa i/o en mode illa: l'inversor de connexió a xarxa i l'inversor híbrid.

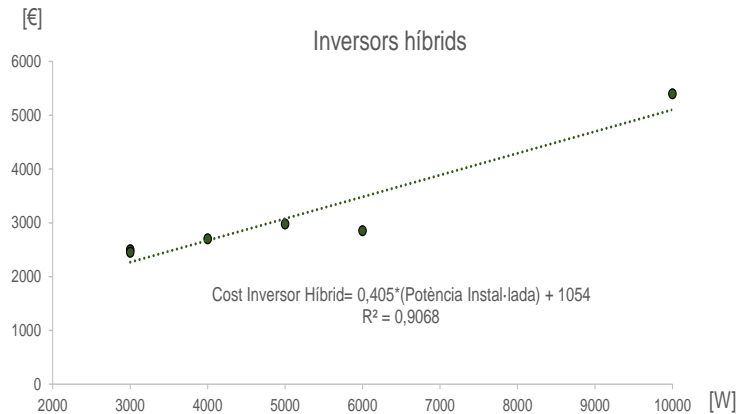
### 3.4.1 Modelització inversor híbrid

Els inversors híbrids són dispositius adaptats per operar sistemes connectats a xarxa amb generació i emmagatzematge distribuït. Degut a la situació actual del mercat, on aquests tipus de sistemes no són molt abundants, la varietat d'inversors híbrids al mercat és reduïda. A la *Figura 3.12* s'observa l'inversor híbrid de 6 kW d'INGECON i es recull la recta que s'ha introduït per modelitzar el cost d'aquests inversors.

L'equació que defineix el cost associat a l'inversor híbrid (3.10):



(a) Inversor Híbrid 6TL INGECON



(b) Relació cost-potència dels inversors híbrids

Figura 3.12: Inversors híbrids

$$\text{Cost Inversor Híbrid} = 0.405 \cdot \text{Potència Instal·lada} + 1054 \quad (3.10)$$

Sent, la Potència instal·lada (3.11):

$$\text{Potència Instal·lada} = kW_{PV} + 2000 \cdot \text{Num Nemo} + 2500 \cdot \text{Num Enair} \quad (3.11)$$

On  $kW_{PV}$ ,  $\text{Num Nemo}$  i  $\text{Num Enair}$  són els kW<sub>pic</sub> de PV, el nombre d'aerogeneradors Nemo2000 i el nombre d'aerogeneradors Enair30 Pro òptims a instal·lar, respectivament. Els valors de 2.000 i 2.500 es corresponen a les potències nominals dels aerogeneradors en W.

### 3.4.2 Modelització inversor de connexió xarxa

Els inversors de connexió a xarxa són dispositius adaptats per operar sistemes connectats a xarxa amb generació distribuïda, però sense emmagatzematge. Aquesta tipologia d'inversors és la més utilitzada actualment en petites instal·lacions d'autoconsum, on la instal·lació PV o eòlica rep el suport de la xarxa. L'objectiu d'aquest tipus d'instal·lacions no és ser autosuficient, sino reduir l'import de la factura elèctrica. A la Figura 3.13 podem observar l'inversor de connexió a xarxa el model de 3 kW d'INGECON i el resultat de l'anàlisi de mercat Cost-Potència realitzat; la mostra de dades és visiblement major que en el cas dels inversors híbrids. De les dues tipologies s'han recullit, indistintament, inversors monofàsics i trifàsics.

L'equació que defineix el cost associat a l'inversor de connexió a xarxa (3.12) és la mostrada a la figura anterior:

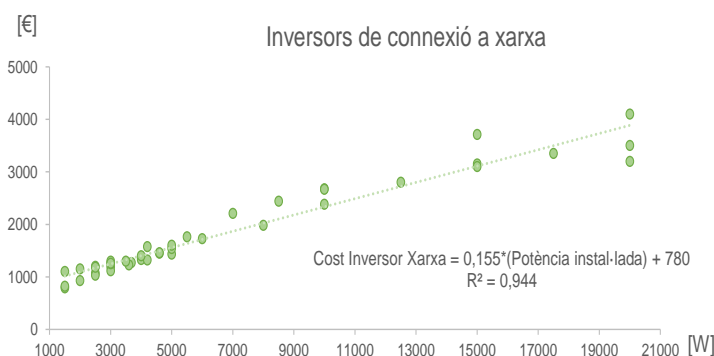
$$\text{Cost Inversor Xarxa} = 0.155 \cdot \text{Potència Instal·lada} + 780 \quad (3.12)$$

Sent, la Potència instal·lada l'especificada a l'eq (3.11).





(a) Inversor Connexió a xarxa 3TSUN INGECON



(b) Relació cost-potència dels inversors de connexió a xarxa

Figura 3.13: Inversors de connexió a xarxa

## 3.5 Modelització de la xarxa elèctrica

La xarxa elèctrica s'ha modelitzat com una font d'energia inesgotable i no s'ha tingut en compte el límit de potència com a restricció. Possibles faltes o caigudes tampoc s'han tingut en compte. El model de microxarxa desenvolupat no contempla que la càrrega no sigui alimentada. La xarxa, per tant, ha de garantir l'energia necessària per cubrir la demanda.

El preu de l'electricitat consumida per la xarxa depèn del tipus de contracte establert entre l'usuari i la companyia comercialitzadora. En aquesta tesi es contemplen únicament 4 tipus de contracte que depenen de la potència contractada i del tipus de tarifa: fixa o discreta.

El preu de l'electricitat associat a cada tarifa s'ha fixat amb els preus que estableix la cooperativa SomEnergia, comercialitzadora amb la que l'Ajuntament de Martorelles vol establir la totalitat dels contractes elèctrics a partir de l'any 2020.

### 3.5.1 Tarifa 2.0

La tarifa 2.0 inclou els consums  $\leq 10$  kW de potència contractada, és la tarifa habitual per habitatges particulars. Els preus per la tarifa fixe (2.0A) i amb discriminació horària (2.0DHA) són els representats a la taula 3.2.

Taula 3.2: Tarifa 2.0

Terme d'energia [€/kWh]	2.1A*	2.1DHA**
Període Punta (P1)	0,13	0,15
Període Vall (P2)	0,13	0,072

\* Tarifa sense discriminació horària

\*\* Tarifa amb discriminació horària

Els períodes de punta (P1) i vall (P2) varien amb l'horari d'estiu i d'hivern. A la taula 3.3 s'ha detallat la distribució d'hores de cada període.

Taula 3.3: Períodes de DHA

	Hivern	Estiu
<b>P1-Punta</b>	12-22h	13-23h
<b>P2-Vall</b>	22-11h	23-12h

### 3.5.2 Tarifa 2.1

La tarifa 2.1 inclou els consums inclosos en el rang 10kW-15kW de potència contractada, és la tarifa habitual per petites empreses. Els preus per la tarifa fixe (2.1A) i amb discriminació horària (2.1DHA) són els representats a la taula 3.4. Els preus per kWh consumit són més cars per la tarifa 2.1 que per la tarifa 2.0. Sorpren que, amb la tarifa 3.0 els preus per kWh consumit es reduïxen gairabé a la meitat.

Taula 3.4: Tarifa 2.1

Terme d'energia [€/kWh]	2.1A*	2.1DHA**
Període Punta (P1)	0,145	0,165
Període Vall (P2)	0,145	0,081

\* Tarifa sense discriminació horària

\*\* Tarifa amb discriminació horària

La instal·lació de generació i emmagatzematge distribuït pot fer reduir la potència contractada d'una tarifa 2.1 a una tarifa 2.0, en aquest cas, l'estalvi anual de l'usuari pot ser molt important. Malauradament, en aquest estudi no s'ha inclòs el terme de potència i no s'ha evaluat la possibilitat d'accedir a un canvi de tarifa.

## 3.6 Modelització del consum

Els consums elèctrics s'han modelitzat a partir de corbes de consum horàries obtingudes a través de la plataforma Endesa Distribució. Els comptadors que permeten realitzar un seguiment només estan instal·lats en els equipaments amb tarifes d'accés 2.0 i 2.1, és a dir, aquells equipaments amb una potència contractada de menys de 10 kW i d'entre 10 kW i 15 kW respectivament. Altrament, és necessari un registre de dades mínim d'un any.

La corba de consum és l'únic *input* del model que varia en cada escenari i és el principal factor per evaluar la viabilitat d'establir una microxarxa. L'evaluació econòmica del projecte considera que el consum no varia anualment, per tant, canvis importants el perfil de demanda desvirtuaran les previsions realitzades. Per altra banda s'ha considerat la demanda com a inamovible i ineludible, és a dir, no s'ha contemplat introduir flexibilitat en la corba de consum.

Per últim, és important remarcar que no s'ha tingut en compte la disponibilitat d'espai a l'hora de dimensionar la microxarxa ni tampoc el consum de potència reactiva.



## Capítol 4

# Formulació matemàtica per optimitzar el dimensionat d'una microxarxa

Aquesta secció recull la caracterització dels elements de la microxarxa exposats i en presenta la resta de restriccions que componen el model desenvolupat per optimitzar el dimensionat d'una microxarxa. Com s'ha explicat a l'inici de la memòria, s'ha fet servir el programari GAMS per resoldre el problema plantejat.

Des de l'inici d'aquesta tesi, s'ha volgut desenvolupar una eina vàlida més enllà de l'interès acadèmic; per aquest motiu s'ha realitzat un estudi acurat dels elements més importants del sistema i s'han introduït costos reals. Com tot projecte d'enginyeria la vessant econòmica és molt important; termes com el VAN, el TIR o el payback són de capital importància.

### 4.1 Funció objectiu

Com a conseqüència dels motius expressats s'ha definit la funció multiobjectiu recollida a l'equació (4.1) on el VAN del projecte, de 20 anys de durada, és la principal variable a maximitzar; per altra banda, l'estalvi anual d'emissions equivalents de  $CO_2$  té un pes 10 vegades menor dins la funció objectiu.

$$OBJ = \alpha \cdot VAN_{20} + \beta \cdot Estalvi_{CO_2} \quad (4.1)$$

Sent  $\alpha$  i  $\beta$  els coeficients de pesat.

### 4.2 Conjunts

S'han definit dos conjunts temporals que s'especifiquen a la taula 4.1.

### 4.3 Variables

S'han definit diverses variables en el model desenvolupat en GAMS. Es distingeixen en variables reals (taula 4.2), variables positives (taula 4.3), variables enteres (taula 4.4) i variables binàries (taula 4.5).

Taula 4.1: Conjunts temporals

Conjunt temporal	Definició	Rang
$\tau$	Hores de l'any	$\{1, \dots, 8760\}$
$\kappa$	Any del projecte	$\{0, \dots, 20\}$

Taula 4.2: Variables del model

Variables	Definició	Unitats
$Bat(t)$	Energia neta que intercanvia la bateria (+) càrrega (-) descàrrega	$kWh$
$OBJ$	Funció objectiu a Maximitzar	€
$CF_n$	Cash Flow actualitzat l'any n	€
$CFa_n$	Cash Flow actualitzat i acumulat l'any n	€
$VAN_{20}$	Valor Actualitzat Net del projecte l'any 20	€

Taula 4.3: Variables Positives

Variables Positives	Definició	Unitats
$SOC(t)$	Estat de càrrega de la bateria	$Wh$
$SOC_{max}$	Capacitat màxima de la bateria de liti	$Wh$
$Grid(t)$	Energia horària que entrega la xarxa	$Wh$
$BatP(t)$	Energia que es carrega a la bateria sii $Bat(t)$ és positiva, en altra cas serà igual a 0	$Wh$
$BatN(t)$	Energia que descarrega a la bateria sii $Bat(t)$ és negatiu, en altra cas serà igual a 0	$Wh$
$Gen(t)$	Generació solar i eòlica horària	$Wh$
$GenPV(t)$	Generació PV horària	$Wh$
$GenWind(t)$	Generació eòlica horària	$Wh$
$Perdues(t)$	Energia retallada pel convertidor que no s'aprofita i no es pot entregar a xarxa degut a les restriccions jurídiques presents a l'Estat Espanyol	$Wh$
$kWPV$	kWpic de panells PV òptims a instal·lar	$kWpic$
$CostPV$	Cost dels panells PV	€
$CostAero$	Cost dels aerogeneradors	€
$CostBat$	Cost de la bateria	€
$CostGrid$	Cost associat a l'energia que es compra a la xarxa	€
$CostConvert$	Cost del convertidor	€
$Inversio$	Inversió inicial del projecte	€
$Estalvi$	Estalvi anual en la factura elèctrica degut a la instal·lació realitzada	€
$GeneracioPV$	Generació anual provinent dels Panells PV	$kWh$
$ConsumGrid$	Consum anual d'electricitat provinent de la xarxa	$kWh$
$PerduesAnuals$	Energia anual retallada pel convertidor	$kWh$
$EstalviCO_2$	$CO_2$ anual estalviat	$kgCO_2eq$

Taula 4.4: Variables Enteres

Variables enteres	Definició	Unitats
<i>NumEnair</i>	Nombre òptim d'aerogeneradors Enair 30	<i>unitats Enair30</i>
<i>NumNemo</i>	Nombre òptim d'aerogeneradors Nemo 2000	<i>unitats Nemo200</i>

Taula 4.5: Variables binàries

Variables binàries	Definició	Unitats
$Y(t)$	Defineix el comportament de la bateria: 1 en mode Càrrega 0 en mode Descàrrega	-

## 4.4 Paràmetres

En quant als paràmetres, en definim de 2 tipus; els intrínsecs al model, especificats a la taula 4.6, i els que varien en funció del consum i la situació geogràfica de l'equipament: la irradiància, la potència eòlica, el consum elèctric i el tipus de tarifa contractada, és a dir, els inputs del model definits a la taula 4.7.

Taula 4.6: Paràmetres

Paràmetres	Definició	Valor	Unitats
<i>eurkWh</i>	Preu dels kWh comprats a xarxa. Pot adoptar dos valors, en funció de la Tarifa d'accés	0,145 ó 0,130	€/kWh
<i>CostInstalacio</i>	Cost associat a la mà d'obra corresponent a la instal·lació [26]	1,2	€/kW
<i>i</i>	Tasa d'interés	0,05	-
$\rho_{PV}$	Rendiment associat a la degradació anual dels panells PV	0,92	-
$\rho_{Conv}$	Rendiment associat a l'inversor	0,95	-
<i>STC</i>	Standard Test Conditions	1000	W/m <sup>2</sup>
<i>CO<sub>2</sub>eq</i>	kg de CO <sub>2</sub> per kWh consumit de la xarxa [27]	0,341	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh
<i>SOC0</i>	Estat de càrrega inicial de la bateria	3.000	Wh
$\rho_{Carr}$	Rendiment associat a la càrrega de la bateria	0,95	-
$\rho_{Desc}$	Rendiment associat a la descàrrega de la bateria	0,95	-
$\rho_{Wind}$	Rendiment associat a l'aerogenerador	1	-
$\alpha$	Pes de la funció objectiu	0,9	-
$\beta$	Pes de la funció objectiu	0,1	€/kgCO <sub>2</sub> eq

Taula 4.7: Inputs del model

Inputs	Definició	Unitats
Irradiacio (t)	Irradiació mitja durant l'hora t	Wh
PotEnair(t)	Energia mitja que entrega un aerogenerador Enair l'hora t	Wh
PotNemo(t)	Energia mitja que entrega un aerogenerador Nemo l'hora t	Wh
Load(t)	Consum de la càrrega durant l'hora t	Wh
Tarifa contractada	Tipus de Tarifa contractada: 2.0A, 2.0DHA, 2.1A o 2.1DHA	-

## 4.5 Restriccions

De cada element de la microxarxa d'estudi s'ha definit el comportament energètic (generació, capacitat d'emmagatzematge, rendiment, etc) i s'ha extret una funció de cost per implementar els elements en el model.

### Equacions energètiques horàries

- **Generació solar fotovoltaica horària** L'equació (4.2) defineix la generació màxima que poden generar els panells fotovoltaics en funció de la potència PV instal·lada.

$$GenPV(t) = kWpic_{PV} \cdot \rho_{PV} \cdot Irradiacio(t) \quad \forall t \in \tau \quad (4.2)$$

- **Generació eòlica horària** L'equació (4.3) defineix la generació màxima que poden generar els aerogeneradors en funció del nombre i el tipus d'aerogeneradors instal·lats.

$$GenWind(t) = (Pot_{Enair}(t) \cdot NumEnair + Pot_{Nemo}(t) \cdot NumNemo) \cdot \rho_{Wind} \quad \forall t \in \tau \quad (4.3)$$

- **Generació renovable horària** L'equació (4.4) defineix la generació màxima renovable que es genera horàriament.

$$Gen(t) = (GenWind(t) + GenPV(t)) \cdot \rho_{Convertidor} \quad \forall t \in \tau \quad (4.4)$$

- **Balanç energètic horari** L'equació (4.5) garanteix el balanç d'energia del sistema. La variable  $Perdues(t)$  representa l'energia que retalla l'electrònica de potència quan la generació renovable supera la demanda i les bateries estan plenes. La variable  $Bat(t)$  es defineix positiva en mode càrrega.

$$Gen(t) + Grid(t) = Bat(t) + Load(t) + Perdues(t) \quad \forall t \in \tau \quad (4.5)$$

- **Balanç energètic horari a la bateria** L'equació (4.6) garanteix el balanç d'energia de la bateria. L'operació de la bateria està definida al capítol anterior.

$$SOC(t) = SOC(t-1) + BatP(t) - BatN(t) \quad \forall t \in \tau \quad (4.6)$$

En el model sense bateries només s'ha inclòs generació fotovoltaica, les equacions que restringeixen aquest model no inclouen les equacions (4.3) (4.6).

Les equacions necessàries per linealitzar la càrrega i descàrrega de la bateria i estableixen els límits del SOC ((3.3) - (3.7)) tampoc estan incloses en el model sense bateries.

### Dimensionat dels elements

El dimensionat dels elements recull les equacions que estableixen el cost de cada component de la microxarxa, així com la instal·lació.

- **Cost dels panells solar fotovoltaics** El cost d'un panell fotovoltaic Amerisolar de 320 Wpic és de 245€, com s'expressa a l'equació (4.7).

$$CostPV = \frac{245}{0.32} \cdot kWpic_{PV} \quad (4.7)$$

- **Cost dels aerogeneradors** El cost dels aerogeneradors (4.8) està estipulat a la taula 3.1.

$$CostWind = 7500 \cdot NumEnair + 2000 \cdot NumNemo \quad (4.8)$$

- **Cost de les bateries** S'han inclòs únicament les bateries d'ió-liti. L'equació (4.9) relaciona la capacitat màxima de la bateria i el cost de la mateixa.

$$CostBat = 0.5625 \cdot SOC_{MAX} + 1151.5 \quad (4.9)$$

- **Cost de l'electrònica de potència** L'equació (4.10) estipula el preu dels inversors híbrids.

$$CostConvert = 0.405 \cdot (kW_{PV} + 2500 \cdot NumEnair + 2000 \cdot NumNemo) + 1054 \quad (4.10)$$

L'equació (4.11) estipula el preu dels inversors de connexió a xarxa. S'ha establert aquesta equació en el model sense bateries.

$$CostConvert = 150 \cdot kW_{pic_{PV}} + 780 \quad (4.11)$$

- **Cost de la inversió** El cost de la inversió inicial del projecte s'estableix a l'equació (4.12).

$$Inversio = (CostPV + CostConvert + CostWind) \cdot CostInstalacio \quad (4.12)$$

En el model sense bateries no s'han inclòs les equacions (4.10), (4.8) ni (4.9).

### Balanç econòmic anual

El balanç econòmic anual recull el cost anual d'electricitat i l'estalvi generat amb la inversió. Es distingeixen les equacions amb tarifes fixes (4.15) (4.16) de les equacions amb tarifes amb discriminació horària (4.13) (4.14) .

- **Cost anual associat a la compra d'electricitat a xarxa amb tarifa variable**

$$Cost\ Grid = \sum_{t \in \tau} (Grid(t) \cdot Eur kWh(t)) \quad (4.13)$$

- **Estalvi anual degut a l'autoconsum amb tarifa variable**

$$Estalvi = \sum_{t \in \tau} ((Load(t) - Grid(t)) \cdot Eur kWh(t)) \quad (4.14)$$

- **Cost anual associat a la compra d'electricitat a xarxa amb tarifa fixe**

$$Cost\ Grid = \sum_{t \in \tau} (Grid(t)) \cdot Eur kWh \quad (4.15)$$

- **Estalvi anual degut a l'autoconsum amb tarifa fixe**

$$Estalvi = \sum_{t \in \tau} ((Load(t) - Grid(t))) \cdot Eur kWh \quad (4.16)$$



### Balanç energètic anual

El balanç energètic anual recull la generació renovable disponible anualment amb la capacitat òptima instal·lada (4.17) (4.18), el consum anual en  $kWh$  de la xarxa (4.19), l'energia retallada per no poder entregar-la a la xarxa (4.20) i els  $Kg$  de  $CO_2$  estalviats anualment amb la generació renovable (4.21).

- **Generació anual PV**

$$GeneracioPV = \sum_{t \in \tau} (GenPV(t)) \quad (4.17)$$

- **Generació anual eòlica**

$$GeneracioWind = \sum_{t \in \tau} (GenWind(t)) \quad (4.18)$$

- **Consum anual de xarxa**

$$ConsumGrid = \sum_{t \in \tau} (Grid(t)) \quad (4.19)$$

- **Pèrdues anuals, energia renovable retallada**

$$PerduesAnuals = \sum_{t \in \tau} (Perdues(t)) \quad (4.20)$$

- **Estalvi emissions  $CO_2$  anual**

$$EstalviCO_2 = (GeneracioPV + GeneracioWind - PerduesAnuals) \cdot CO_2Eq \quad (4.21)$$

### Anàlisi de la inversió

Per analitzar la inversió s'han calculat els CashFlow actualitzats i els CashFlow acumulats durant els 20 anys de projecte. En el model de GAMS no s'han introduït ni el TIR ni el PAYBACK, que es calculen posteriorment amb els CashFlows òptims.

- **Cash flow actualitzat** Hi han 21 equacions que representen els fluxos de caixa actualitzats durant els 20 anys de projecte (4.22)-(4.25). Els ingressos són els estalvis anuals, els costos són la inversió inicial l'any 0 (4.22) i el renovació de l'electrònica de potencia a mig projecte (4.24).

$$CF(0) = -Inversio \quad (4.22)$$

$$CF(1) = \frac{Estalvi}{(1+i)^1} \quad (4.23)$$

$$CF(10) = \frac{Estalvi - CostConvert}{(1+i)^{10}} \quad (4.24)$$

$$CF(n) = \frac{Estalvi}{(1+i)^n} \quad \forall n \in \kappa \setminus \{0, 10\} \quad (4.25)$$

- **Valor Actualitzat Net del projecte** El VAN del projecte, variable a maximitzar, es calcula a l'equació (4.26)

$$VAN_{20} = \sum_{n \in \kappa} CF_n \quad (4.26)$$

## 4.6 Solvers

Per resoldre problemes d'optimització lineal GAMS ofereix diferents alternativess. La literatura destaca solvers comercials com CPLEX, GUROBI o XPRESS l'accés als quals no ha estat possible durant la realització d'aquesta tesi. [28] Per resoldre el model presentat s'ha disposat de 3 solvers lliures: BDMLP, CBC i SCIP. Les solucions obtingudes amb cada solver per model es representen a la taula 4.8.

El model sense bateries s'ha resolt amb els 3 solvers disponibles en GAMS. La solució, un òptim global, és la mateixa en els 3 casos. En quant al temps d'execució el solver SCIP és el que més temps necessita per resoldre el problema. En el model amb bateries la situació canvia degut a la introducció de variables binàries. El solver BDLMP no dona a una solució òptima i el solver CBC no retorna cap solució. El solver SCIP, en canvi, retorna un òptim global. És per aquest motiu que s'han realitzat totes les simulacions amb el solver SCIP.

El solver SCIP (Solving Constraint Integer Programs) ha estat desenvolupat al Zuse Institute Berlin (ZIB) en cooperació amb altres institucions. A GAMS el SCIP utilitza SoPlex (si no en té llicència pel CPLEX) per resoldre problemes lineals. El SoPlex (Sequential object-oriented simplex) és un paquet d'optimització per resoldre problemes de programació lineal basat en una implementació avançada del primal i el dual de l'algoritme Simplex. El SoPlex va ser desenvolupat al Zuse Institute Berlin.

Taula 4.8: Anàlisi comparatiu dels solvers lliures

MILP* solvers	Microxarxa amb bateries		Microxarxa sense bateries	
	Output	Temps d'execució	Output	Temps d'execució
BDMLP	128 € Feasible sloution	-	3123 € Global optim solution	18,39 segons
CBC	485 € Non solution returned	-	3123 € Global optim solution	19,03 segons
SCIP	485 € Global optim soluion	321,12 segons	3123 € Global optim solution	21,05 segons



## Capítol 5

# Cas d'estudi

### 5.1 Introducció al cas d'estudi

Durant l'any 2010 el municipi de Martorelles va encarregar un estudi per a poder licitar el manteniment de l'enllumenat, donat que s'exhauria el contracte. L'estudi que es va encarregar incloïa la possibilitat de fer-hi actuacions que permetessin aconseguir un estalvi energètic sensible. L'estudi va comportar que es detectés una despesa energètica d'uns 99.141 euros anuals per a l'any 2010. Aquesta xifra va semblar excessiva i per això es va ampliar l'esmentat estudi a una auditoria que aprofundís en la reducció de la despesa realitzant intervencions bàsiques en les instal·lacions d'enllumenat públic. Com que l'import era elevat es va decidir fer un contracte que estava destinat a una Empresa de Serveis Energètics i consistia en què l'empresa es feia càrrec de les intervencions i recuperava la inversió mitjançant la diferència entre la despesa inicial en energia i la despesa que es s'havia d'aconseguir un fet els canvis en l'enllumenat.

Al cap d'un any de l'inici del contracte s'havia arribat a un 52% d'estalvi en energia elèctrica. Els bons resultats obtinguts van fer plantejar a l'Ajuntament de Martorelles, la possibilitat de intervenir en d'altres punts de consum energètic de titularitat municipal, donat que la despesa en els edificis municipals era alta es va prendre la decisió d'encarar un projecte global d'eficiència i estalvi energètics. Així va sorgir el projecte Energètica amb un membre fundador, l'Ajuntament de Martorelles, i amb altres membres col·laboradors i patrocinadors que d'alguna manera participen en aquest projecte transversal per l'Estalvi Energètic: l'IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, la Diputació de Barcelona i SECE, una empresa especialista enllumenat públic.

La trajectòria d'Energètica va facilitar l'avenç entre l'Ajuntament de Martorelles i l'estudiant per portar a terme un projecte d'integració d'energies renovables al municipi, que s'ha concretat en la tesi presentada en aquesta memòria.

L'ajuntament de Martorelles compta amb més de 40 equipaments municipals com escoles, edificis d'oficines, biblioteca, locals d'entitats, llar d'infants, equipaments esportius, etc. Els nivells i les corbes de consum són diversos, com també ho són les possibilitats d'implementar-ne recursos energètics. L'accés a dades horàries de consum, element clau per estudiar el dimensionat òptim de la microxarxa, ha restringit l'accés als edificis amb una potència contractada major que 15 kW.

Aquest treball ha estudiat la viabilitat energètica i econòmica d'instal·lar generació renovable distribuïda als següent equipaments municipals:

- Ajuntament
- Local de la Brigada
- Centre de Salut
- Casal d'Avis
- Edifici Central

S'ha dimensionat la instal·lació òptima de microxarxes amb i sense bateries per edificis que han contractat tarifes amb i sense discriminació horària. Per facilitar la lectura de la tesi s'han mostrat únicament els estudis realitzats a l'Ajuntament (Tarifa 2.0) i al Centre de Salut (Tarifa 2.1), sent els edificis on la integració de renovables presenta els majors retorns econòmics. Les solucions obtingudes a la resta d'edificis s'han recullit a l'annex A.

### Dimensionat òptim d'una microxarxa sense bateries

Aquests tipus d'instal·lacions són les més atractives econòmicament degut a la mínima inversió requerida. El sistema a instal·lar és més senzill i, al no comptar amb sistemes d'emmagatzematge, el preu dels convertidors també és reduït. Per altra banda, la potència renovable instal·lada acostuma a ser menor per no excedir el consum i haver de retallar la generació.

El model que s'ha optimitzat en aquesta secció està esquematitzat a la *Figura 5.1*.

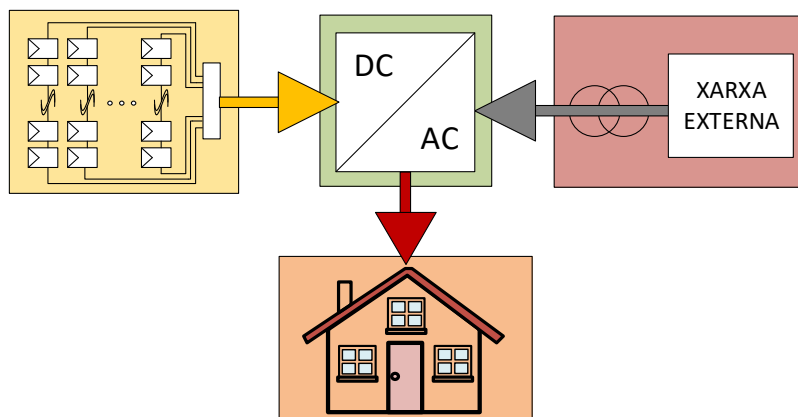


Figura 5.1: Model PV sense bateries

Com es pot observar a la *Figura 5.1* el convertidor ha de garantir un balanç de potència tal que la generació i el consum siguin iguals. El convertidor dona prioritat a l'energia provinent dels panells fotovoltaics i, si no és suficient per suplir la demanda, permetrà l'entrada d'energia de la xarxa. En cas que l'energia fotovoltaica superi la demandada per la càrrega, el convertidor retallarà l'energia fotovoltaica per no excedir el consum.

## Dimensionat òptim d'una microxarxa amb bateries

Les microxarxes amb bateries no són molt atractives econòmicament degut a l'elevada inversió inicial requerida. La major part de les instal·lacions que compten amb generació distribuïda i bateries no estan connectades a la xarxa, és a dir, són instal·lacions autosuficients. El model que s'ha desenvolupat al llarg d'aquesta tesi, esquematitzat a la *Figura 5.2*, es sustenta sobre transformar edificis connectats a xarxa en microxarxes, per tant no es contemplan situacions d'aïllament de la xarxa. A l'annex B s'ha identificat que el cost de les bateries ha de disminuir un 30 % per no generar pèrdues i un 60% per obtenir el mateix benefici que una instal·lació fotovoltaica sense bateiries.

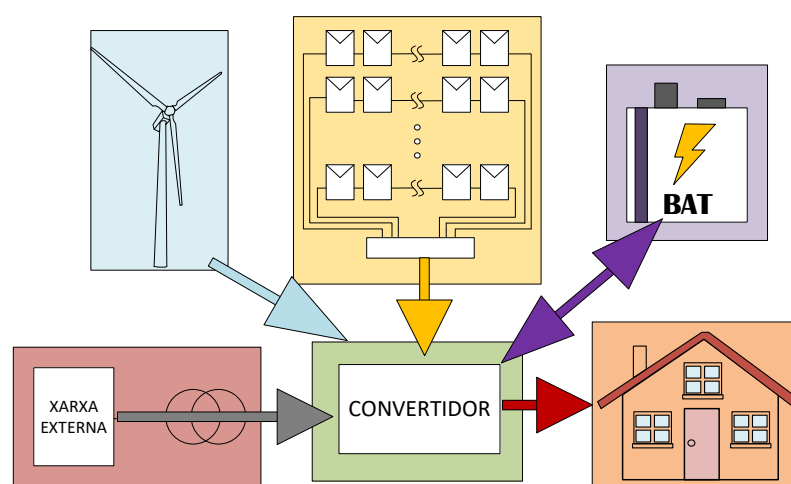


Figura 5.2: Model microxarxa amb bateries

Com es pot observar a la *Figura 5.2* el convertidor ha de garantir l'estabilitat del sistema. En cas que la generació renovable superi el consum es carregaran las bateries; si aquestes estan al màxim de la seva capacitat, el convertidor retallarà l'energia generada. Si la generació no supera el consum, les bateries entregaran l'energia necessària; en cas que l'energia emmagatzemada no sigui suficient per cobrir la demanda es comprarà energia a la xarxa. En cas de tenir una tarifa amb discriminació horària, les bateries es carregaran durant les hores de preu vall i es descarregaran durant les hores de preu pic.

## 5.2 Ajuntament

L'Ajuntament de Martorelles 5.3 és un edifici de dues plantes situat a la zona sud-est del municipi. La cara nord de l'ajuntament presideix la plaça de la vila mentre que la cara sud enfoca un petit aparcament. Amb una teulada de més de 80 m<sup>2</sup> sense ombres, l'ajuntament presenta característiques òptimes per integrar tant panells fotovoltaics com miniaerogeneradors.



Figura 5.3: Ajuntament de Martorelles

Font: martorelles.cat

L'edifici té contractats dos punts de sumministrament; el primer alimenta els servidors i té un consum molt estable d'un 1 kWh aproximadament, el segon correspon al propi edifici i la corba de consum és molt similar a una corba d'oficines. A la *Figura 5.4* s'ha representat el consum corresponent al servidor, a l'edifici de l'ajuntament i el consum total durant la segona setmana de Juliol. A l'estudi s'ha tingut en compte un únic punt de sumministrament amb la suma dels dos consums.

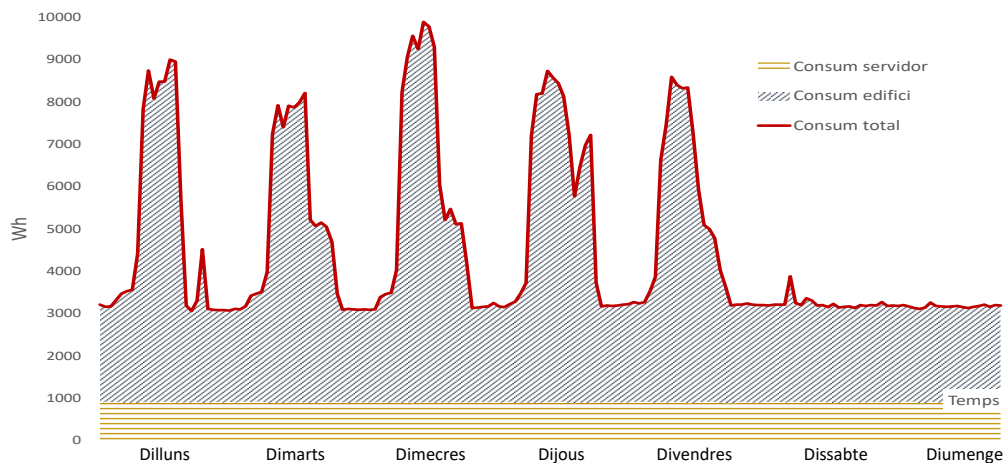


Figura 5.4: Consum de l'Ajuntament durant la segona setmana de Juliol

A la *Figura 5.5* s'observa el consum de l'any 2017 dels servidors i de l'edifici. Es pot observar que el consum màxim és al mes de Juliol, ocasionat per l'ús dels aires acondicionats.

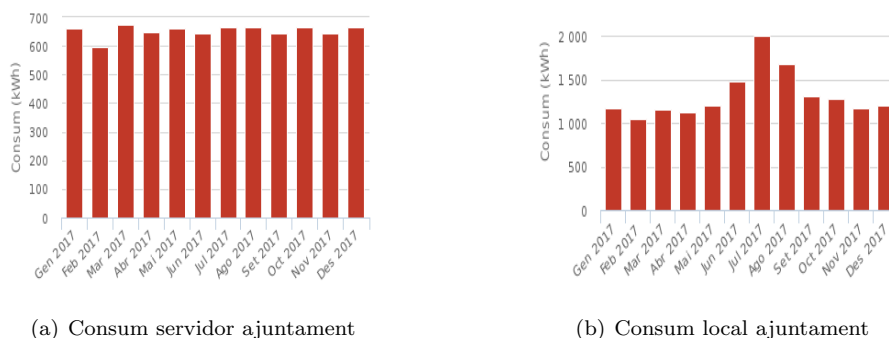


Figura 5.5: Consum elèctric any 2017

La tarifa d'accés de tots dos equipaments és la 2.0A, que correspon a potències inferiors als 10 kW i una tarifa sense discriminació horària. El cost anual en factures elèctriques supera els 4.000 €, sent l'equipament estudiat amb un consum més elevat.

### 5.2.1 Dimensionat òptim d'una microxarxa sense bateries. Model PV Ajuntament

Els resultats obtinguts en el dimensionat òptim d'una microxarxa sense bateries a l'edifici de l'ajuntament s'han recollit a la taula 5.1. La solució òptima per la tarifa 2.0A és de 10 kW (30 panells Amerisolar), mentre que per la tarifa 2.0DHA és de 9.2 kW (27 panells Amerisolar).

Taula 5.1: Resultats Ajuntament

Ajuntament 2.0	Tarifa 2.0A	Tarifa 2.0DHA
OBJ [€]	7.228	4.703
Inversió [€]	11.884	11.072
Estalvi [€]	1.612	1.340
kW <sub>pic</sub> PV [kW <sub>pic</sub> ]	10	9,2
Estalvi CO <sub>2</sub> [kg]	4.228	4.034
VAN [€]	6.806	4.300
TIR	11,2%	9,3%
Payback [Anys]	11	13
i	5%	5%

Ambdós anàlisis s'han realitzat amb una tasa d'interès,  $i$ , del 5%. S'observa que la solució òptima obtinguda per la tarifa 2.0A (7.228 €) presenta un valor més elevat que per la tarifa 2.0DHA (4.703 €) fet que avala la contractació d'una tarifa sense discriminació horària. Els indicadors econòmics d'ambdues inversions són positius,  $VAN \geq 0$  i  $TIR \geq i$ , tot i així la solució amb tarifa sense discriminació horària presenta un VAN (6.806 €) i una TIR (11,2 %) més elevats que la tarifa amb discriminació. Per altra banda, s'observa que el període de retorn de la inversió amb la tarifa 2.0A (11 anys) és més reduït que amb la tarifa 2.0DHA (13 anys).

A la Figura 5.6 s'han representat els fluxos de caixa actualitzats per les dues inversions.



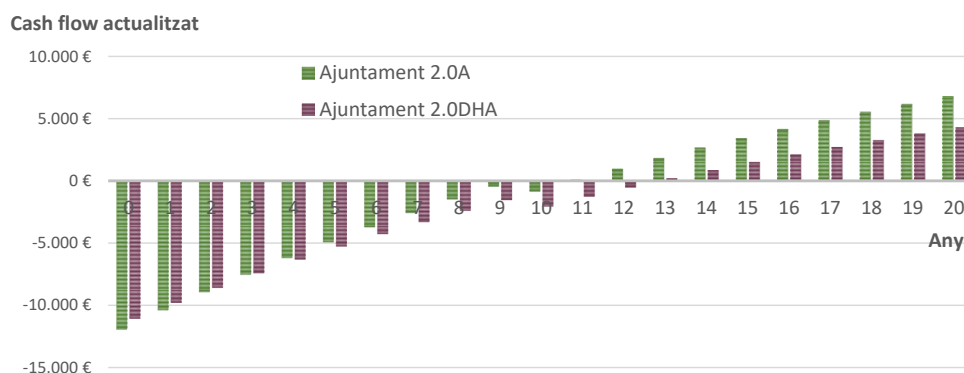


Figura 5.6: Evolució Cash Flow acumulat: PV Ajuntament

En funció de la tarifa contractada els kWpic de fotovoltaica instal·lats varien, com s'observa a la taula 5.1. En conseqüència l'energia fotovoltaica també varia, com s'observa a la *Figura 5.7*, on el percentatge d'energia solar per la tarifa 2.0A és del 39% (12.400 kWh) front el 37% (11.830 kWh) de la tarifa amb discriminació horària.

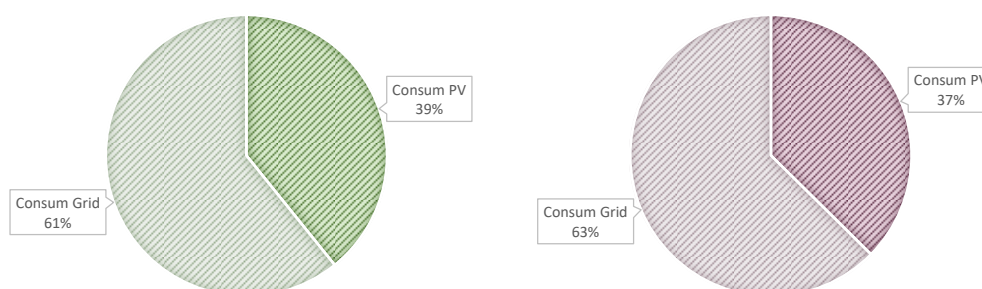


Figura 5.7: Percentatge d'energia verda consumida: PV Ajuntament. Esquerra - Tarifa 2.0A. Dreta - Tarifa 2.0DHA

### 5.2.1.1 Cost de la instal·lació sense bateries

El cost de la inversió inicial és més elevat en el cas de la tarifa 2.0A (11.884 €) que a la tarifa 2.0DHA (11.072 €) com a resultat de la major potencia fotovoltaica instal·lada. A la *Figura 5.8* s'escenifica la distribució de costos per les dues alternatives, descomposant la inversió inicial en el cost dels panells fotovoltaics, el cost del convertidor i els costos associats a la instal·lació. Com es pot observar, la distribució dels costos és molt similar en ambdues situacions.

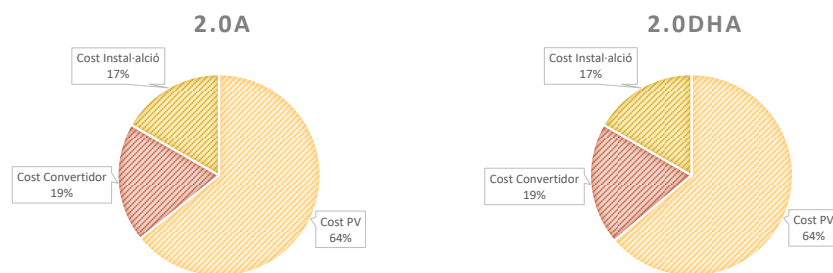


Figura 5.8: Distribució del cost a la inversió inicial: PV Ajuntament

### 5.2.1.2 Operació de la microxarxa sense bateries

L'operació d'una microxarxa sense bateries no varia en funció de la tarifa elèctrica contractada, per aquest motiu es presenten únicament els resultats per la tarifa 2.0A. El dimensionat òptim de l'ajuntament indica una instal·lació de 10 kW<sub>pic</sub> de panells fotovoltaics, és a dir, 30 panells Amerisolar. La Figura 5.9 mostra, sobre el consum anual, la generació fotovoltaica generada i la compra d'energia a la xarxa. S'han agrupat les dades horàries mensualment per poder observar l'any estudiat. Durant els mesos de primavera i estiu s'observa com la generació solar ha superat el consum; als mesos de tardor i hivern en canvi, el consum supera la generació renovable i, per tant, s'haurà de retallar menys energia.

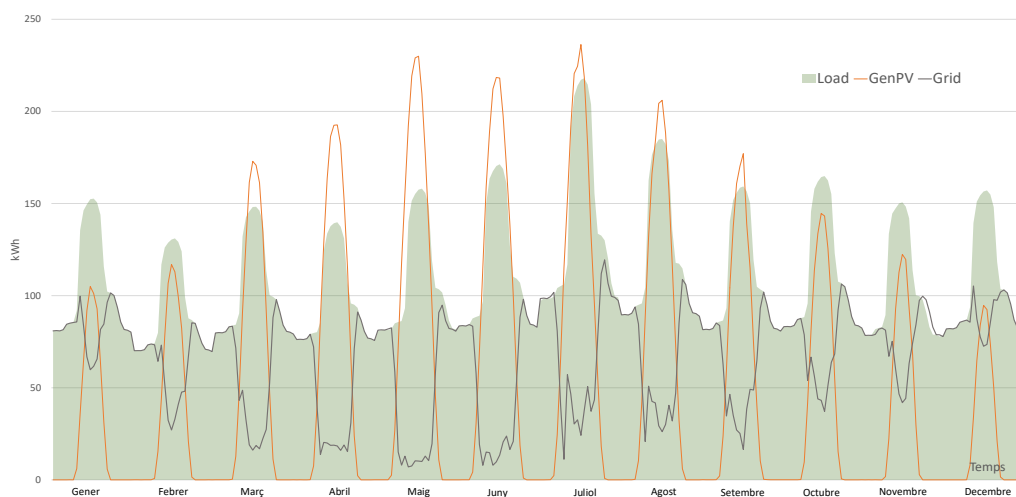


Figura 5.9: Operació anual: PV Ajuntament

La Figura 5.10 mostra l'operació durant la segona setmana de Febrer i la Figura 5.11 durant la segona setmana de Juliol. Sorprenentment la dinàmica de les dues gràfiques és molt semblant, tot i que l'escala és diferent. Tant a l'estiu com a l'hivern, durant els dies laborables, la generació i el consum s'equiparan. En canvi, durant els caps de setmana, es retalla la major part de l'energia generada. Com la generació durant els mesos d'estiu és més gran també ho són les pèrdues, com s'observa a la Figura 5.9.

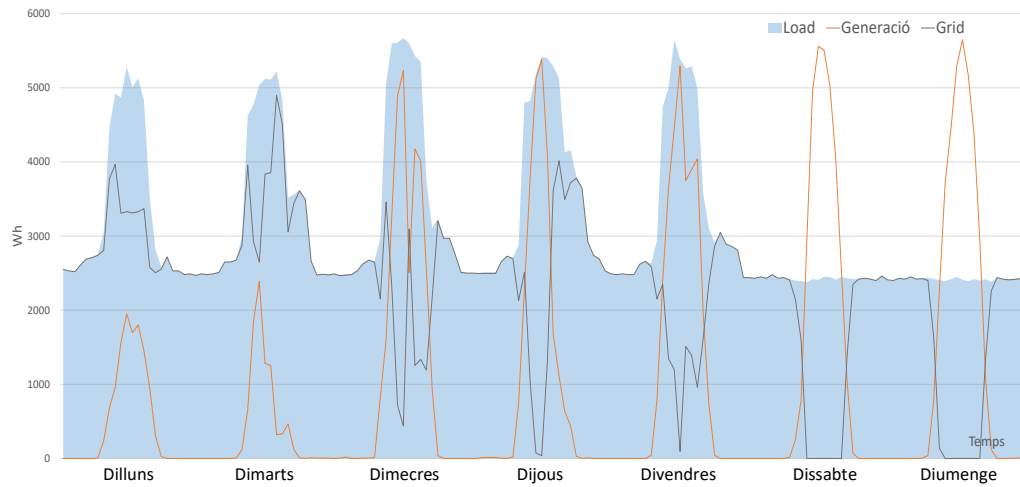


Figura 5.10: Operació segona setmana de Febrer: PV Ajuntament

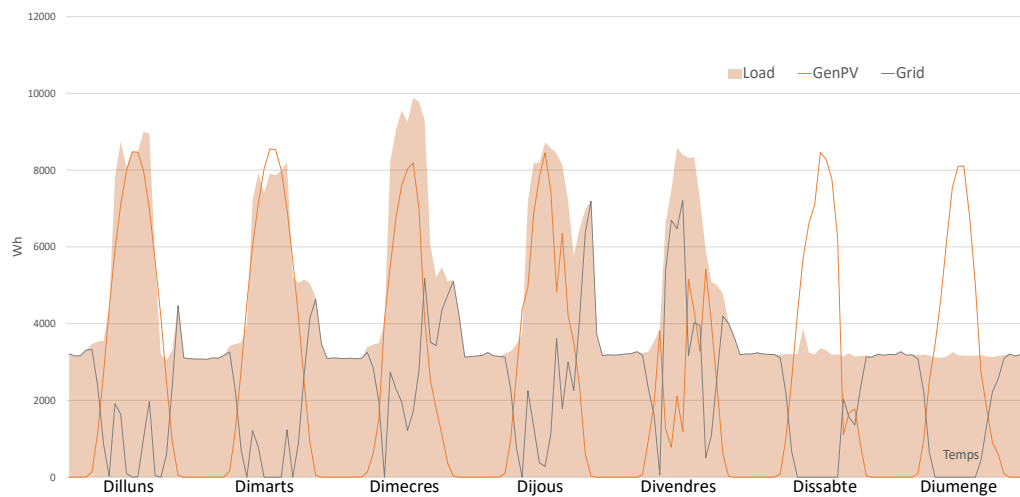


Figura 5.11: Operació segona setmana de Juliol: PV Ajuntament

### 5.2.2 Dimensionat òptim d'una microxarxa amb bateries. Model Microgrid Ajuntament

Els resultats obtinguts a l'edifici de l'ajuntament pel dimensionat òptim d'una microxarxa amb bateries s'ha recollit a la taula 5.2. De la mateixa manera que amb el model sense bateries, s'ha realitzat l'estudi per una tarifa amb discriminació horària i per una tarifa sense discriminació horària. Es pot observar que en cap situació es recomana instal·lar aerogeneradors, per altra banda, la capacitat màxima de las bateries instal·lades és de 3.000 Wh, és a dir, el mínim imposat en el model. Per últim els kW<sub>pic</sub> de fotovoltaica òptims per la tarifa 2.0A és de 8,73 kW (27 panells Amerisolar) i per la tarifa 2.0DHA és de 6,06 kW (19 panells Amerisolar).

Taula 5.2: Resultats Microgrid Ajuntament

Ajuntament 2.0	Tarifa 2.0A	Tarifa 2.0DHA
OBJ	323	-1.190
Inversió [€]	16.360	12.614
Estalvi [€]	1.532	1.066
kWpic PV [kWpic]	8,73	6,06
NumEnair [kW]	0	0
NumNemo [kW]	0	0
SOCmax [kWh]	3.000	3.000
Estalvi CO2 [kg]	4.019	2.915
VAN [€]	-79	-1.482
TIR	4,9%	3,5%
Payback [Anys]	-	-
i	5%	5%

A la taula 5.2 es pot observar que cap inversió és rendible econòmicament ja que el  $VAN \leq 0$  i el  $TIR \leq 5\%$ . Tot i així la solució amb la Tarifa 2.0A presenta una funció objectiu més gran, així com un VAN (-79 €) i un TIR (4.9%) majors que els corresponents a la tarifa amb discriminació horària. Degut a que el VAN de tots dos projectes és negatiu no hi ha retorn de la inversió, com es pot observar a la Figura 5.12.

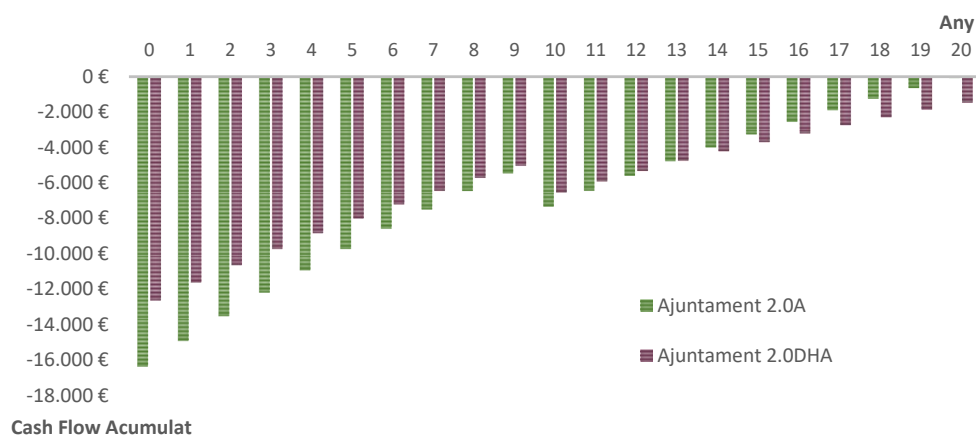


Figura 5.12: Evolució Cash Flow acumulat: Microgrid Ajuntament

El dimensionat òptim per una tarifa 2.0A estableix en un 37% l'energia renovable consumida, front el 27% que s'estableix amb la tarifa 2.0DHA com es pot observar a la Figura 5.13.

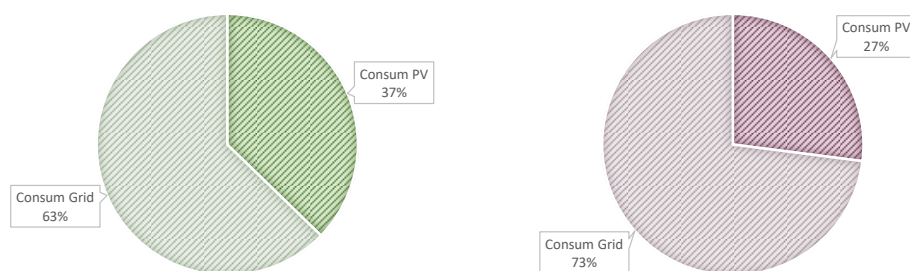


Figura 5.13: Percentatge d'energia renovable consumida: Microgrid Ajuntament. Esquerra - Tarifa 2.0A. Dreta - Tarifa 2.0DHA

### 5.2.2.1 Cost de la instal·lació amb bateries

La inversió inicial dels projectes amb bateries és més elevada degut al cost d'aquetes. A la Figura 5.14 s'observa la distribució de costos pel dimensionat òptim per cadascuna de les tarifes:

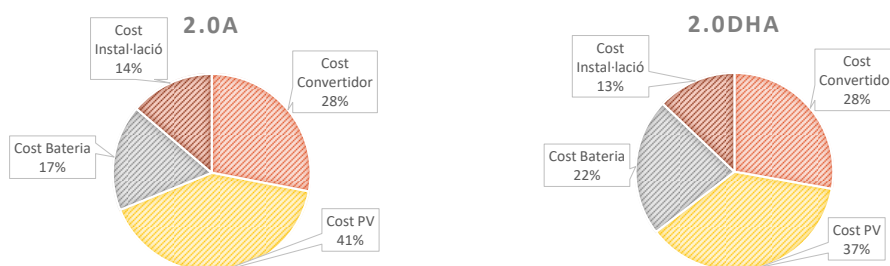


Figura 5.14: Distribució del cost a la inversió inicial: Microgrid Ajuntament

El cost de la bateria és de 2.800 € un 17% i un 22% de les inversions inicials per les tarifes 2.0A i 2.0DHA respectivament. El cost de l'electrònica de potència 4.585 € i 3.505 € representa un 28% de la inversió inicial, que tornarà a invertir-se l'any 10. Aquests costos són els responsables de la inviabilitat econòmica del projecte.

### 5.2.2.2 Operació de la microxarxa amb bateries

A diferència d'una microxarxa sense emmagatzematge, la tarifa elèctrica contractada influeix en la operació de la microxarxa. Les bateries es carreguen en hores vall i es descarreguen en hores pic afectant el comportament del sistema. És per aquest motiu que estudiarem les dues situacions.

### Operació de la microxarxa amb bateries i tarifa sense discriminació horària

La *Figura 5.15* mostra el consum anual, la generació fotovoltaica generada i la compra d'energia a la xarxa per el dimensionat òptim amb la tarifa 2.0A. S'han agrupat les dades horàries mensualment per poder observar l'any estudiat.

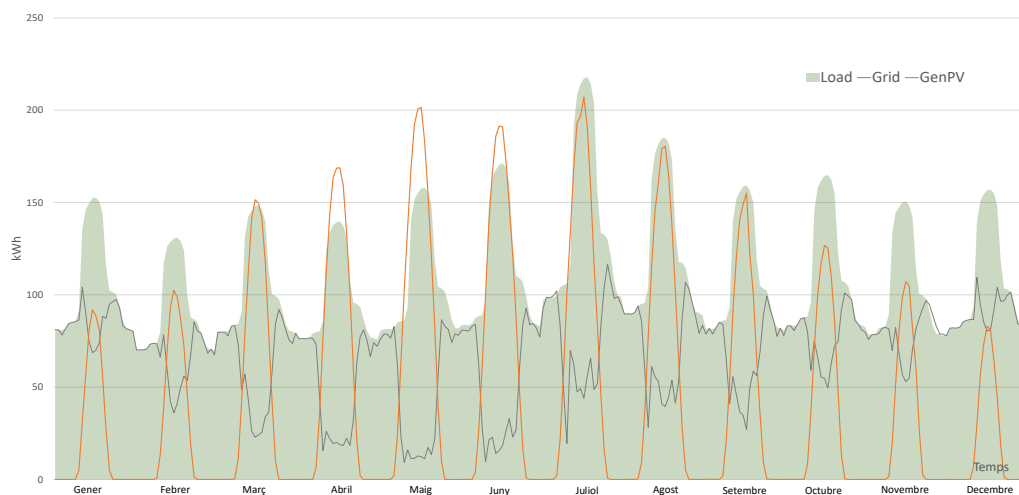


Figura 5.15: Operació anual tarifa 2.0A: Microgrid Ajuntament

La *Figura 5.16* mostra l'operació durant la segona setmana de Febrer i la *Figura 5.17* durant la segona setmana de Juliol. L'anàlisi setmanal ha permès graficar l'estat de càrrega de la bateria (SOC). Tant a l'estiu com a l'hivern, durant els dies laborables el consum supera la generació i las bateries romanen descarregades. En canvi, durant els caps de setmana, degut a la disminució en el consum es carreguen les bateries durant les hores de sol i es descarreguen durant la nit.

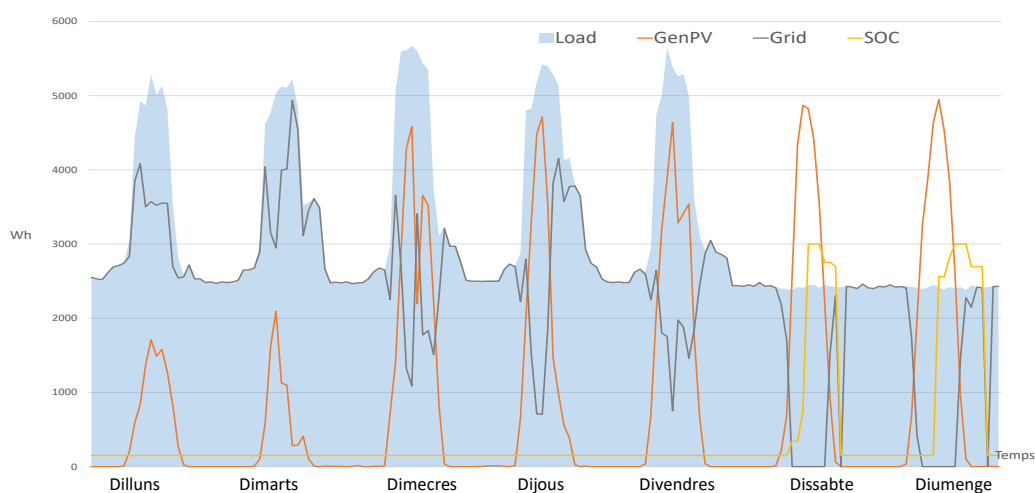


Figura 5.16: Operació segona setmana de Febrer tarifa 2.0A: Microgrid Ajuntament

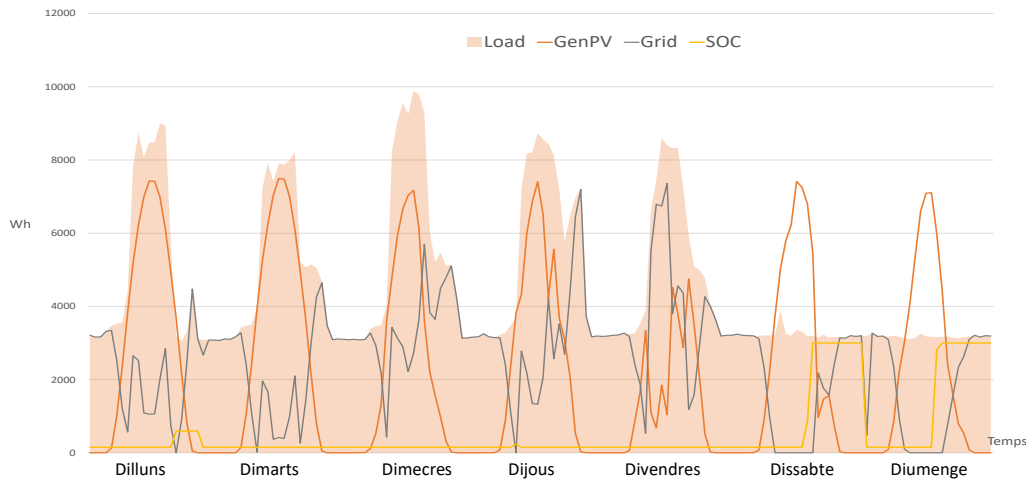


Figura 5.17: Operació segona setmana de Juliol tarifa 2.0A: Microgrid Ajuntament

### Operació de la microxarxa amb bateries i tarifa amb discriminació horària

La *Figura 5.18* mostra el consum anual, la generació fotovoltaica generada i la compra d'energia a la xarxa per el dimensionat òptim amb la tarifa 2.0DHA. S'han agrupat les dades horàries mensualment per poder observar l'any estudiat.

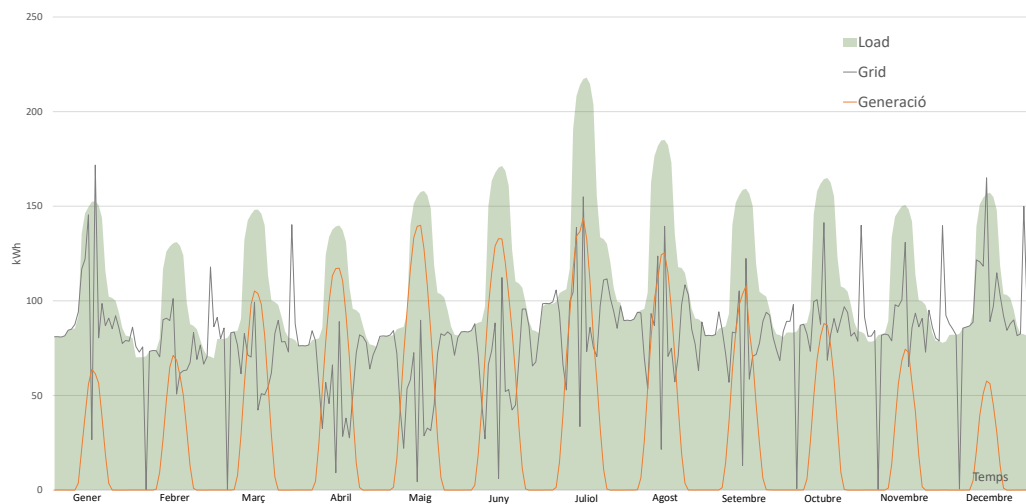


Figura 5.18: Operació anual tarifa 2.0DHA: Microgrid Ajuntament

La generació en aquest estudi és inferior degut a la menor presència de fotovoltaica (6 kW<sub>pic</sub>), la principal diferència però és la corba corresponent a la compra d'energia a la xarxa. S'observa una irregularitat al llarg del dia que és correspon amb la variació del cost del kWh.

La *Figura 5.19* i la *Figura 5.20* mostra l'operació de la microxarxa durant la segona setmana de Febrer i de Juliol respectivament. A diferència que amb la tarifa 2.0A, les bateries no romanen descarregades durant els dies laborables. Tot i que la generació no superi el consum, les bateries es carreguen duren les hores vall i es descarreguen durant les hores pic.

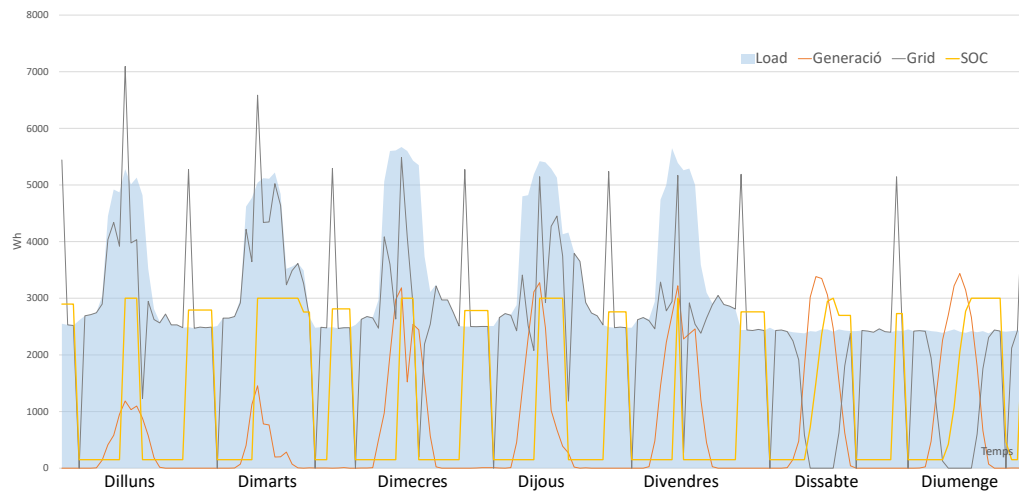


Figura 5.19: Operació segona setmana de Febrer tarifa 2.0DHA: Microgird Ajuntament

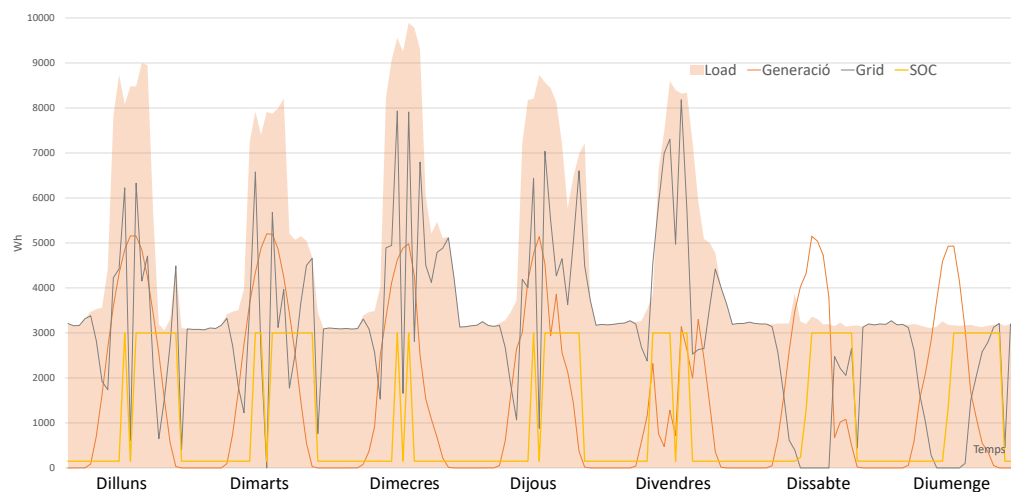


Figura 5.20: Operació segona setmana de Juliol tarifa 2.0DHA: Microgrid Ajuntament

### 5.3 Centre de Salut

El Centre de Salut de Martorelles [5.21](#) és situa en un primer pis de l'Avinguda Piera, el carrer principal del municipi. A diferència del local de l'Ajuntament, la seva situació no garanteix que es pugui desenvolupar un projecte d'integració de renovables. Tot i així, és el segon equipament estudiat que més energia consumeix. Altrament, és un bon exemple de els resultats que es poden obtenir en un edifici que té contractat una tarifa elèctrica 2.1, és a dir, amb una potència contractada entre 10 i 15 kW.





Figura 5.21: Centre de Salut de Martorelles

Font: martorelles.cat

El consum del Centre de Salut supera els 24.000 kWh anuals, el que suposa únicament en termes d'energia 3.500€ l'any.

### 5.3.1 Dimensionat òptim d'una microxarxa sense bateries. Model PV Centre Salut

Els resultats obtinguts en el dimensionat òptim d'una microxarxa sense bateries al Centre de Salut s'han recollit a la taula 5.3. La solució òptima per la tarifa 2.1A és de 5.9 kW (18 panells Amerisolar), mentre que per la tarifa 2.1DHA és de 5.5 kW (17 panells Amerisolar).

Taula 5.3: Resultats Centre de Salut

Centre de Salut 2.1	Tarifa 2.1A	Tarifa 2.1DHA
OBJ [€]	4.526	2.910
Inversió [€]	7.442	7.001
Estalvi [€]	1.023	856
kWpic PV [kWpic]	5,9	5,5
Estalvi CO2 [kg]	2.406	2.313
VAN [€]	4.286	2.679
TIR	11,3%	9,3%
Payback [Anys]	11	13
i	5%	5%

Ambdós anàlisis s'han realitzat amb una tasa d'interès,  $i$ , del 5%. S'observa que la solució òptima obtinguda per la tarifa 2.1A (4.526 €) presenta un valor més elevat que per la tarifa 2.1DHA (2.910 €) fet que avala la contractació d'una tarifa sense discriminació horària. Els

indicadors econòmics d'ambdues inversions són positius,  $VAN \geq 0$  i  $TIR \geq i$ , tot i així la solució amb tarifa sense discriminació horaria presenta un VAN (4.286 €) i una TIR (11,3 %) més elevats que la tarifa amb discriminació. Per altra banda, s'observa que el període de retorn de la inversió amb la tarifa 2.1A (11 anys) és més reduït que amb la tarifa 2.1DHA (13 anys).

A la *Figura 5.22* s'han representat els fluxs de caixa actualitzats per les dues inversions així com el percentatge d'energia fotovoltaica consumida.

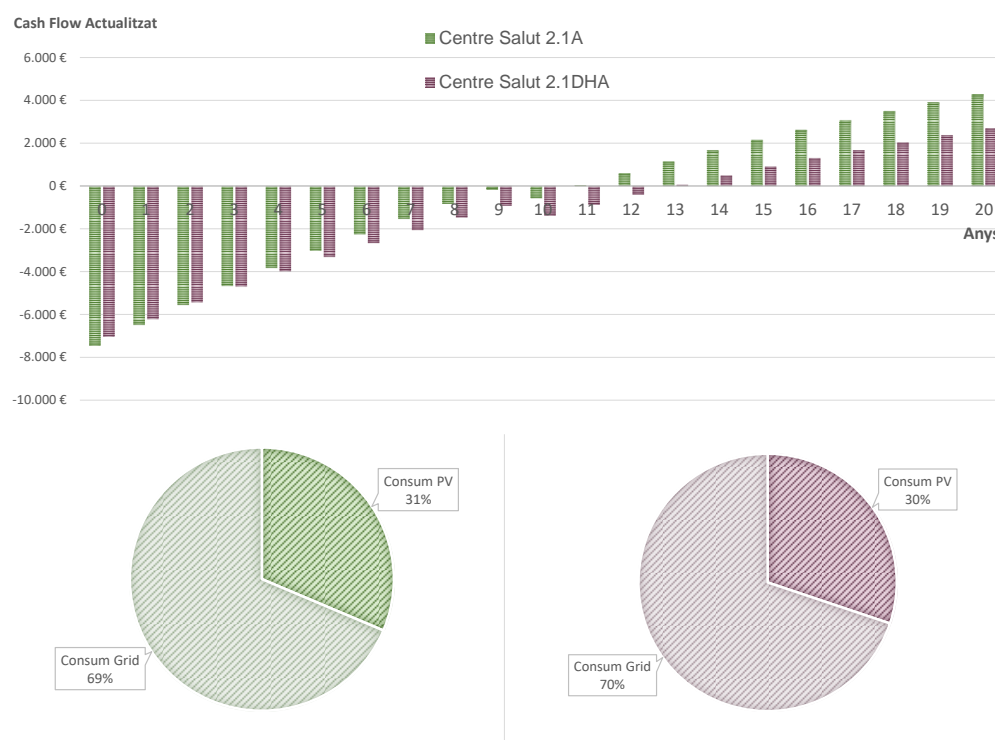


Figura 5.22: Evolució Cash Flow acumulat i percentatge d'energia fotovoltaica: PV Centre Salut

S'observa que l'energia fotovoltaica consumida és molt semblant: 7.056 kWh per la tarifa 2.1A i 6.783 kWh per la tarifa amb discriminació horària.

### 5.3.1.1 Cost de la instal·lació sense bateries

El cost de la inversió inicial és més elevat en el cas de la tarifa 2.1A (7.442 €) que a la tarifa 2.1DHA (7.001 €) com a resultat de la major potencia fotovoltaica instal·lada. A la *Figura 5.23* s'escenifica la distribució de costos per les dues alternatives, descomposant la inversió inicial en el cost dels panells fotovoltaics, el cost del convertidor i els costos associats a la instal·lació. Com es pot observar, la distribució dels costos és molt similar en ambdues situacions.

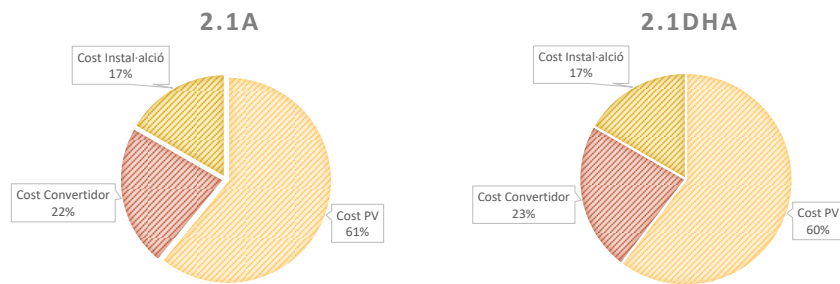


Figura 5.23: Distribució del cost a la inversió inicial: PV Centre Salut

### 5.3.1.2 Operació de la microxarxa sense bateries

De la mateixa manera que en l'exposició de resultats per l'edifici de l'Ajuntament es presenten únicament els resultats per la tarifa sense discriminació horària. A la *Figura 5.24* es descriu el comportament de la microxarxa durant un any. A la *Figura 5.25* i *5.26* s'observa el comportament durant la segona setmana de Febrer i Juliol respectivament.

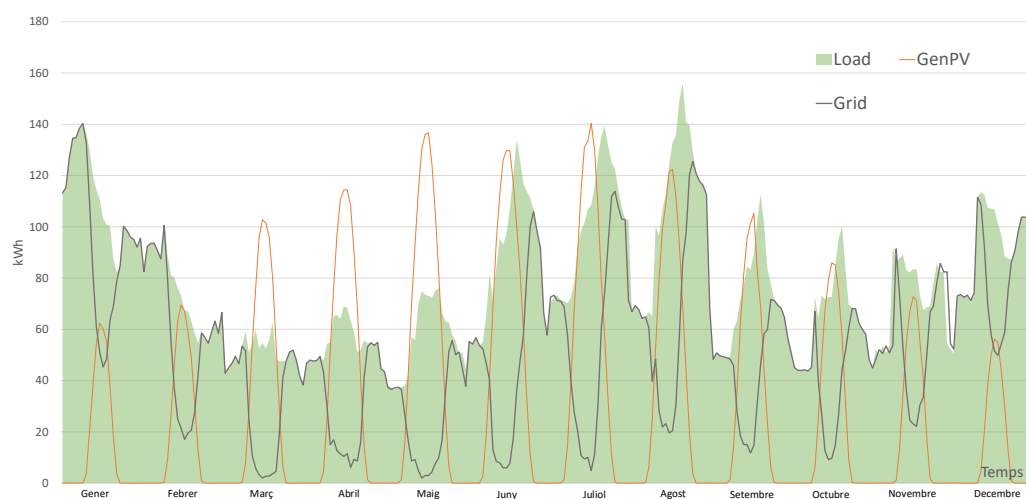


Figura 5.24: Operació anual: PV Centre de Salut

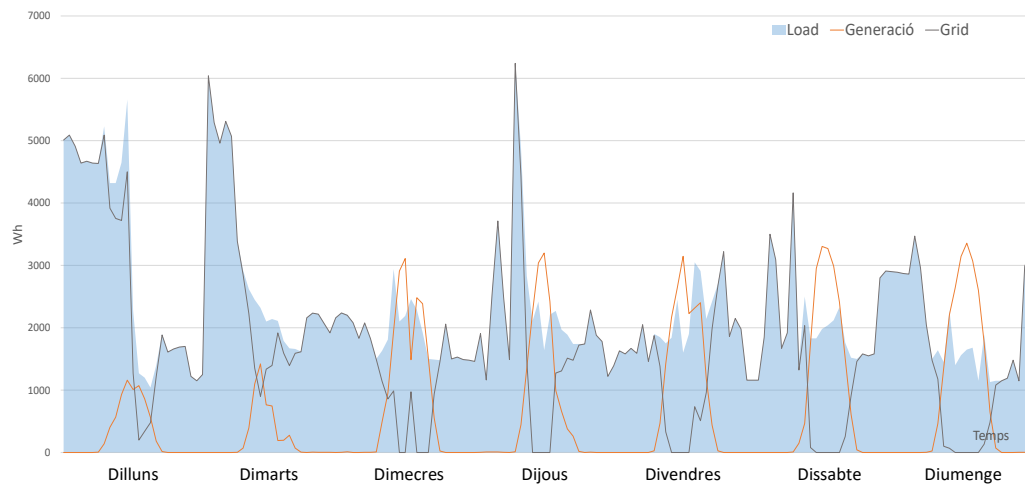


Figura 5.25: Operació segona setmana de Febrer: PV Centre de Salut

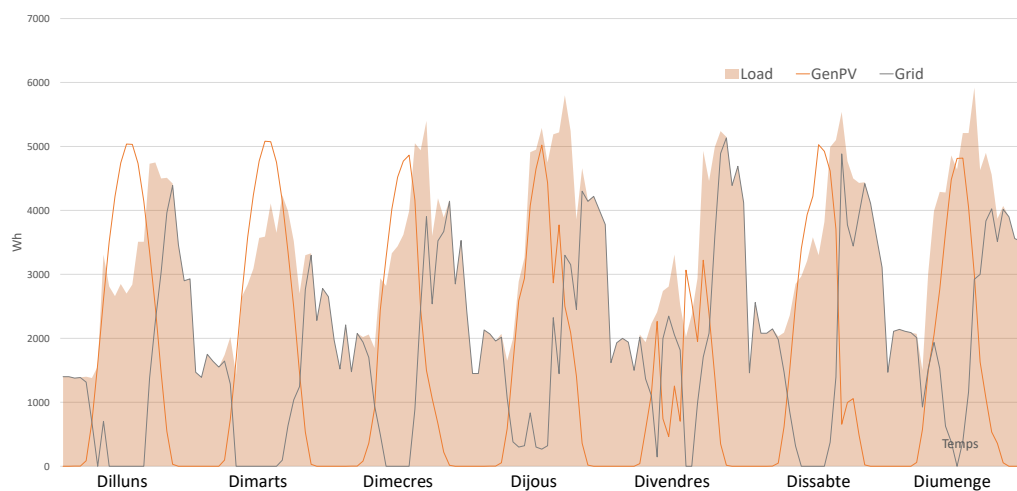


Figura 5.26: Operació segona setmana de Juliol: PV Centre de Salut

A la *Figura 5.24* observem l'operació anual del Centre de Salut, durant els mesos d'hivern la generació és insuficient per suplir el consum. Cal destacar que durant la primavera és el període amb menys consum i l'increment en la generació fotovoltaica provoca que s'ha de retallar gran part de l'energia generada. A l'estiu tant la generació com el consum augmenten i es situen en nivells semblants. Durant la tardor la distribució és semblant a la de l'estiu però amb una reducció de consum i generació.

A les *Figures 5.25* i *5.26* s'observen pics puntuals en el consum que expliquen la necessitat d'una tarifa 2.1. A diferència del estudi realitzat a l'ajuntament el consum durant el cap de setmana no es redueix dràsticament, fet que comporta un millor aprofitament de la instal·lació fotovoltaica.

### 5.3.2 Dimensionat òptim d'una microxarxa amb bateries. Model Microgrid Centre de Salut

Els resultats obtinguts al centre de salut es recollen a la taula 5.4. Tant al model amb tarifa 2.1A com al model amb tarifa 2.1DHA es pot observar que no es òptim instal·lar aerogeneradors i, de la mateixa manera que en el model de l'ajuntament, les bateries es situen al mínim imposat pel model, és a dir, 3.000 Wh. Els kWpic de fotovoltaica òptims per la tarifa 2.1A són 5,4 kW (17 panells Amerisolar) i per la tarifa 2.1DHA són 4,6 kW (14 panells Amerisolar). La tarifa sense discriminació horària presenta una funció objectiu més gran (-914 €) que la tarifa sense discriminació horària (-1.801 €), a la *Figura 5.27* s'observa l'evolució dels Cash Flows per ambdues inversions, com mostra la taula 5.4 cap inversió és rendible econòmicament ja que el VAN  $\leq 0$  i el TIR  $\leq 5\%$ .

Taula 5.4: Resultats Microgrid Centre Salut

Centre de Salut 2.1	Tarifa 2.1A	Tarifa 2.1DHA
OBJ	-914	-1.801
Inversió [€]	11.740	10.563
Estalvi [€]	1.010	830
kWpic PV [kWpic]	5,4	4,6
NumEnair [kW]	0	0
NumNemo [kW]	0	0
SOCmax [kWh]	3.000	3.000
Estalvi CO2 [kg]	2.375	2.063
VAN [€]	-1.151	-2.008
TIR	3,8%	2,6%
Payback [Anys]	-	-
i	5%	5%

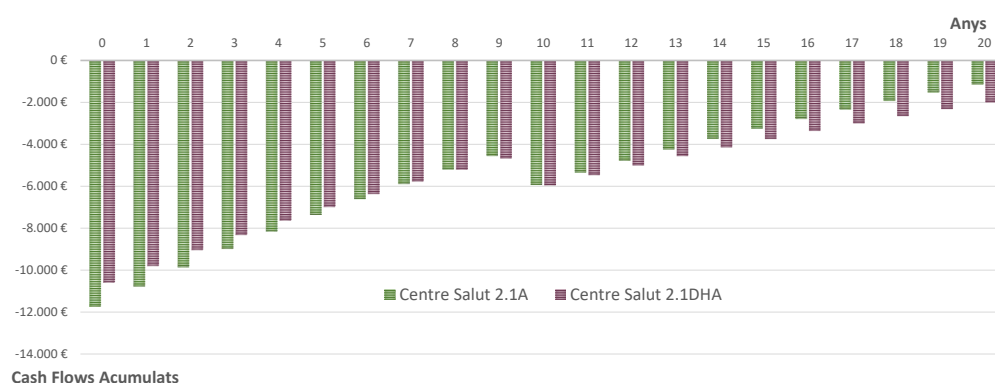


Figura 5.27: Evolució Cash Flow acumulat: Microgrid Centre de Salut

Amb la tarifa 2.1A l'energia renovable consumida és superior (6.965 kWh) que amb la tarifa 2.1DHA (6.049 kWh) com es pot observar a la *Figura 5.28*.

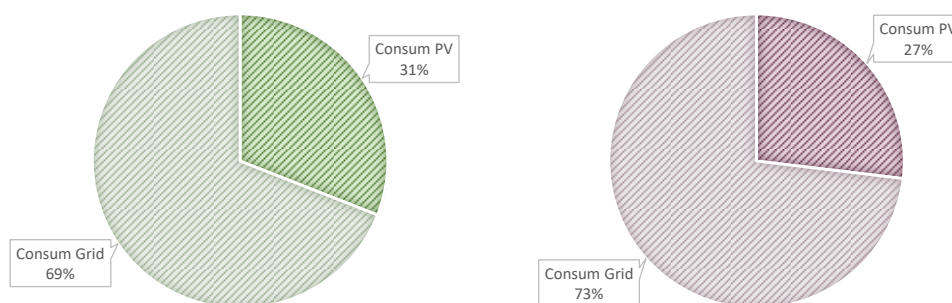


Figura 5.28: Percentatge d'energia renovable consumida: Microgrid Centre de Salut. Esquerra - Tarifa 2.1A. Dreta - Tarifa 2.1DHA

### 5.3.2.1 Cost de la instal·lació amb bateries

La inversió inicial dels projectes amb bateries és més elevada. A la *Figura 5.29* s'observa la distribució de costos pel dimensionat òptim amb cadascuna de les tarifes.

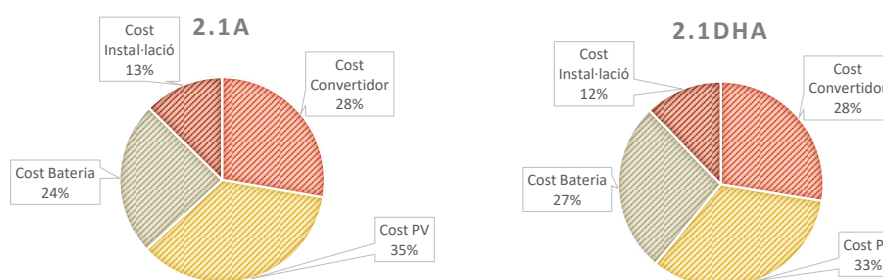


Figura 5.29: Distribució del cost a la inversió inicial: Microgrid Centre de Salut

El cost de la bateria és de 2.800 € un 24% i un 27% de les inversions inicials per les tarifes 2.1A i 2.1DHA respectivament. El cost de l'electrònica de potència 3.253 € i 2.914 € i representa un 28% de la inversió inicial, sent el cost més elevat el corresponent als panells fotovoltaics 4.164 € i 3.523 € respectivament.

### 5.3.2.2 Operació de la microxarxa amb bateries

Per facilitar el seguiment de la memòria es presenta l'escenari amb tarifa sense discriminació horària. La *Figura 5.30* mostra el consum anual, la generació fotovoltaica generada i la compra d'energia a la xarxa per el dimensionat òptim amb la tarifa 2.1A. S'han agrupat les dades horàries mensualment per poder observar l'any estudiat. S'observa que la principal diferència entre la generació i el consum es dona als mesos d'hivern i primavera. Durant els mesos freds el consum és molt més gran que la generació, el que comporta haver de comprar més energia a la xarxa. Durant els mesos de primavera, en canvi, la generació fotovoltaica supera el consum i, per tant, s'haurà de retallar el perfil de generació. Altrament s'observa

un desplaçament horari entre el consum i la generació fotovoltaica que impedeix un millor aprofitament de l'energia solar.

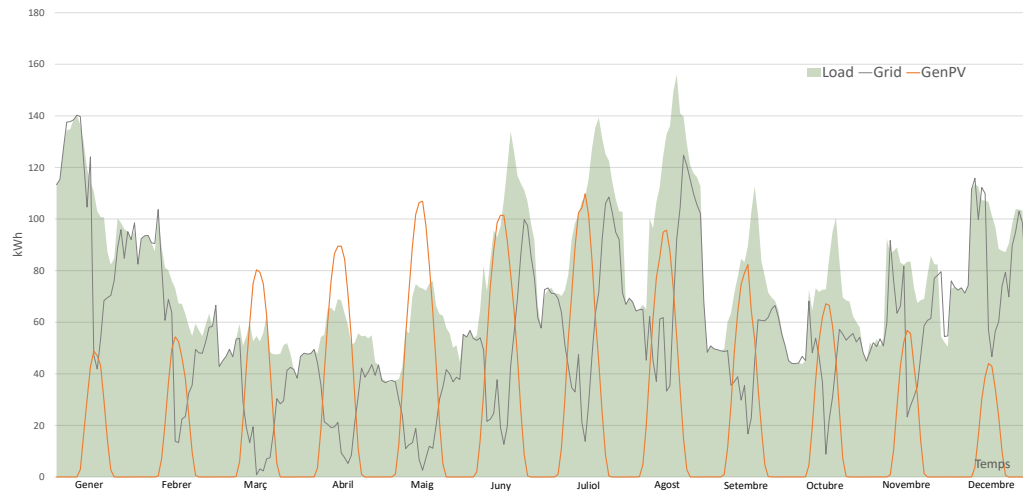


Figura 5.30: Operació anual tarifa 2.1A: Microgrid Centre de Salut

La [Figura 5.31](#) mostra l'operació durant la segona setmana de Febrer i la [Figura 5.32](#) durant la segona setmana de Juliol.

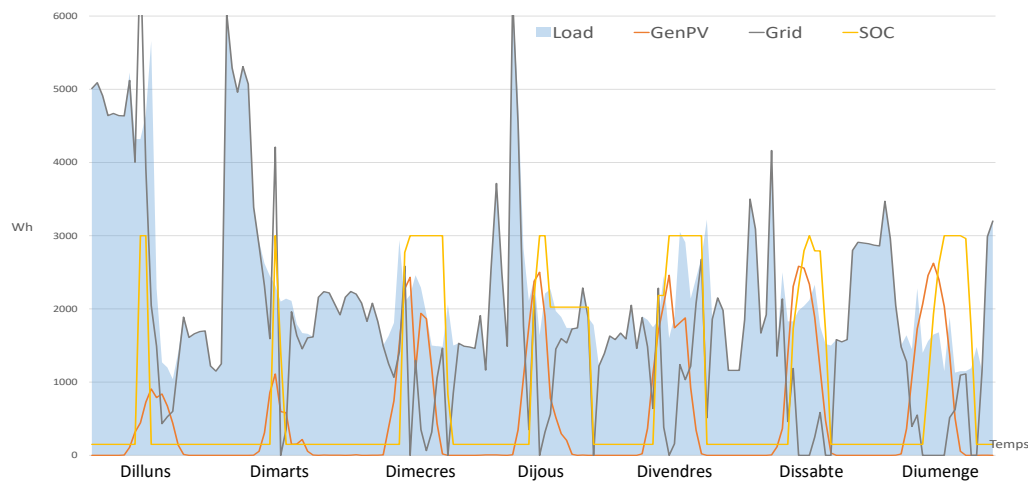


Figura 5.31: Operació segona setmana de Febrer tarifa 2.1A: Microgrid Centre de Salut

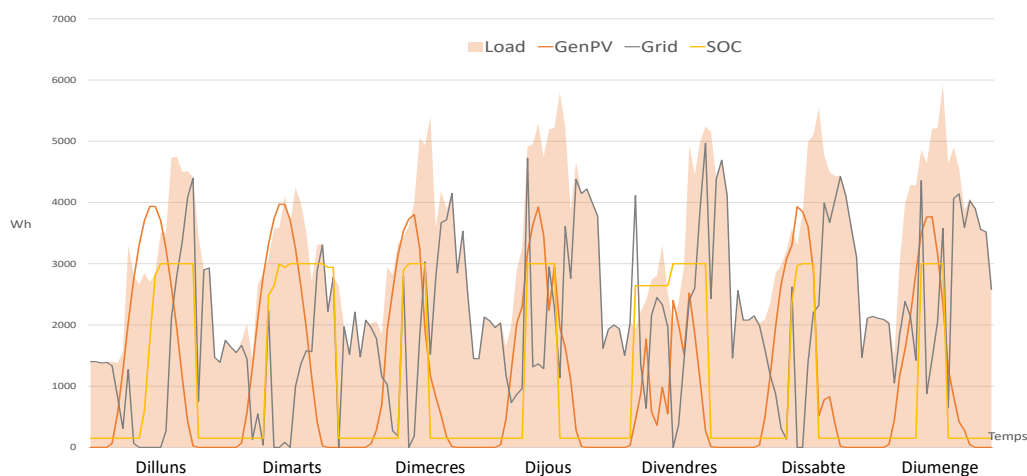


Figura 5.32: Operació segona setmana de juliol tarifa 2.1A: Microgrid Centre de Salut

Es pot observar com les bateries es carreguen únicament quan la generació supera el consum.

## 5.4 Conclusions del Cas d'estudi

Els resultats obtinguts als edificis estudiats durant la realització de la tesi avalen dur a terme instal·lacions fotovoltaiques a l'Ajuntament i al Centre de Salut. S'ha observat que els projectes que comporten la integració de bateries no són econòmicament rendibles. Seria interessant estudiar la disminució de la potència contractada per millorar el retorn econòmic, introduir bateries per reduir la potència contractada d'una tarifa 2.1 a una tarifa 2.0 significaria una reducció important en la factura.

Per altra banda s'ha pogut comprobar que, als equipaments que s'ha tingut accés, les simulacions amb tarifes sense discriminació horària presenten millors resultats econòmics. Altrament, degut a la diferència de preus per kWh consumit, els edificis amb tarifa 2.1 presenten més oportunitats per desenvolupar projectes d'integració renovable.

Durant el cas d'estudi s'ha evidenciat la importància de la corba de consum a l'hora de obtenir un dimensionat òptim d'una microxarxa. Per desenvolupar un model energèticament sostenible es necessari, prèviament a la transformació d'un consum a una microxarxa, un estudi d'eficiència energètica per electrificar la demanda i reduir al màxim el consum.

S'ha identificat que les microxarxes sense emmagatzematge retallen una part important de la generació per tal de no superar el consum. Per garantir l'aprofitament de tot el potencial energètic s'haurien d'introduir, per exemple, càrregues flexibles. Altres opcions que no s'han plantejat perquè es situen fora del marc legal són vendre els excedents d'energia a la distribuïdora/comercialitzadora o la interconnexió de diferents microxarxes.

En conclusió, actualment és rendible econòmicament integrar recursos renovables en alguns edificis i l'eina desenvolupada en aquesta tesi permet avaluar la idoneïtat de la instal·lació coneixent el consum horari de l'equipament.





## Conclusions

El present projecte tenia per objectiu presentar un model per analitzar el comportament i optimitzar el dimensionat d'una microxarxa a partir de la corba de consum horari d'un edifici. Aquest objectiu s'ha complert satisfactoriament detallant el procediment i els resultats en aquesta memòria. Per desenvolupar aquest projecte s'han realitzat les següents tasques:

- Modelar el comportament d'una microxarxa i caracteritzar els principals elements que la componen.
- Incorporar dades de consum, irradiació i vent reals per garantir un resultat acurat a la zona geogràfica d'estudi.
- Analitzar l'impacte econòmic de la instal·lació optimitzada per tal de validar una possible inversió.

L'eina desenvolupada es capaç d'obtenir els kW<sub>pic</sub> fotovoltaics òptims a instal·lar en una microxarxa sense bateries, així com els kW<sub>pic</sub> fotovoltaics, el nombre d'aerogeneradors i la capacitat òptima de la bateria en una microxarxa amb emmagatzematge. La metodologia desenvolupada aporta millores significatives respecte altres propostes actuals que utilitzen valors mitjos o no obtenen òptims globals.

Els resultats obtinguts en el cas d'estudi demostren la viabilitat econòmica de realitzar projectes d'integració de panells fotovoltaics, el retorn de la inversió per aquest tipus d'instal·lacions és situa entorn els 10 anys. Amb les consideracions realitzades en el dimensionat i la operació de la microxarxa, les bateries no seran econòmicament viables fins una reducció en el cost del 50-60%.

## Treball Futur

El treball realitzat en aquest projecte pot ser ampliat segons las següents línies d'acció:

- Iniciar un projecte per instal·lar panells solars fotovoltaics a l'edifici de l'Ajuntament i fer un seguiment de l'operació de la microxarxa per validar el model.
- Analitzar l'impacte econòmic d'una reducció en la potència contractada.
- Estudiar una eventual interconnexió entre dues microxarxes.
- Incorporar un escenari que contempli la venda d'energia a la comercialitzadora.



# Agraïments

Primerament, vull agrair al Josep M<sup>a</sup> Ortiz, al Santi Gallardo i al Marc Candela haver-me obert les portes de l'Ajuntament de Martorelles, facilitant i donant sentit al treball realitzat durant aquests mesos.

Agrair a l'Eduard Bullich i la Mònica Aragüés el suport, la dedicació i la confiança, sense ells aquest treball no hauria estat possible. També agrair a la resta de companys del CITCEA l'ajuda desinteressada, especialment al Francisco Díaz, al Pol Olivella i a l'Andreas Sumper.

Per últim, vull donar les gràcies a la meva família per la paciència i el suport incondicional al llarg d'aquests anys, especialment a la Irene, la seva estima ha estat imprescindible per seguir caminant.



## Apèndix A

# Estudi microxarxa sense emmagatzematge: Model PV

Aquesta secció recull els resultats obtinguts en el dimensionat d'una instal·lació fotovoltaica sense emmagatzematge en els equipaments municipals no inclosos en la memòria:

- Local de la Brigada
- Casal d'avis
- Local Central

### A.1 Local de la Brigada

A la taula [A.1](#) es presenten els resultats obtinguts amb les tarifes 2.1A i 2.1DHA al local de la brigada.

Taula A.1: Resultats model PV: Local Brigada

Local Brigada 2.1	Tarifa 2.1A	Tarifa 2.1DHA
OBJ	-105	-518
Inversió [€]	3.070	2.726
Estalvi [€]	285	223
kWpic PV [kWpic]	1,9	1,6
Estalvi CO2 [kg]	671	599
VAN [€]	-172	-578
TIR	4%	2,3%
Payback [Anys]	-	-

A la taula es pot observar que cap de les inversions és rentable:

- $VAN \leq 0$
- $TIR \leq 5\%$
- Payback inexistent

S'ha graficat l'evolució del Cash Flow actualitzat d'ambdues inversions a la *Figura A.1*, per altra banda, hi ha graficat el percentatge d'energia renovable que es consumiria a les dues situacions.

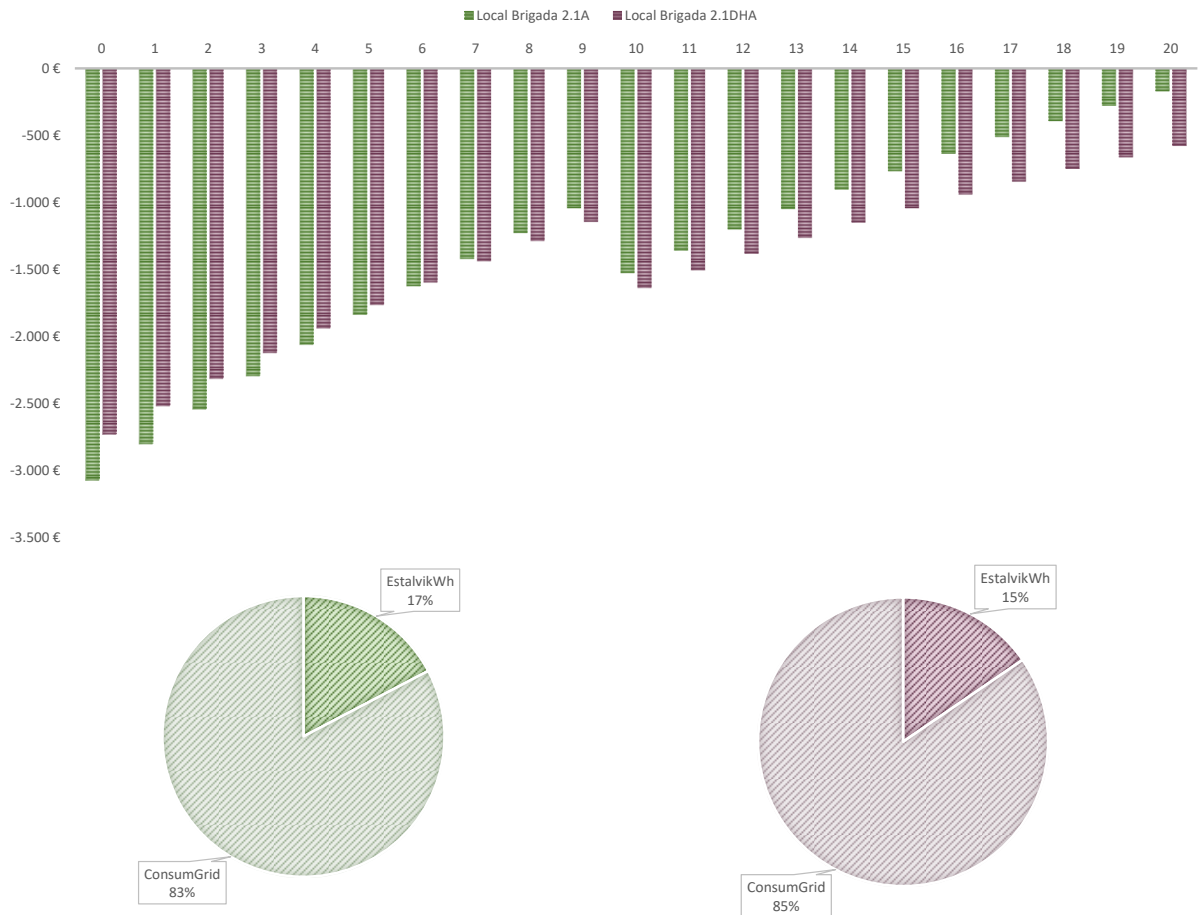


Figura A.1: Resultats model PV: Local Brigada

S'observa que, tot i no recomanar cap inversió, es preferible contractar una tarifa sense discriminació horària.

## A.2 Casal d'Avis

Els resultats obtinguts al Casal d'Avis es recullen a la taula [A.2](#).

Taula A.2: Resultats model PV: Casal d'Avis

Casal Avis 2.1A	Tarifa 2.1A	Tarifa 2.1DHA
OBJ	1.135	356
Inversió [euro]	4.001	3.633
Estalvi [€]	462	369
kWpic PV [kWpic]	2,8	2,5
Estalvi CO2 [kg]	1.087	1.008
VAN [€]	1.026	255
TIR	7,9%	5,8%
Payback [Anys]	15	19

S'observa que ambdós projectes són rentables, tot i així, el dimensionat òptim per la tarifa sense discriminació horària presenta millors resultats.

- $VAN \geq 0$
- $TIR \geq 5\%$

L'evolució del cashflow acumulat i el percentatge d'energia renovable consumida estat explicats a la *Figura A.2*.

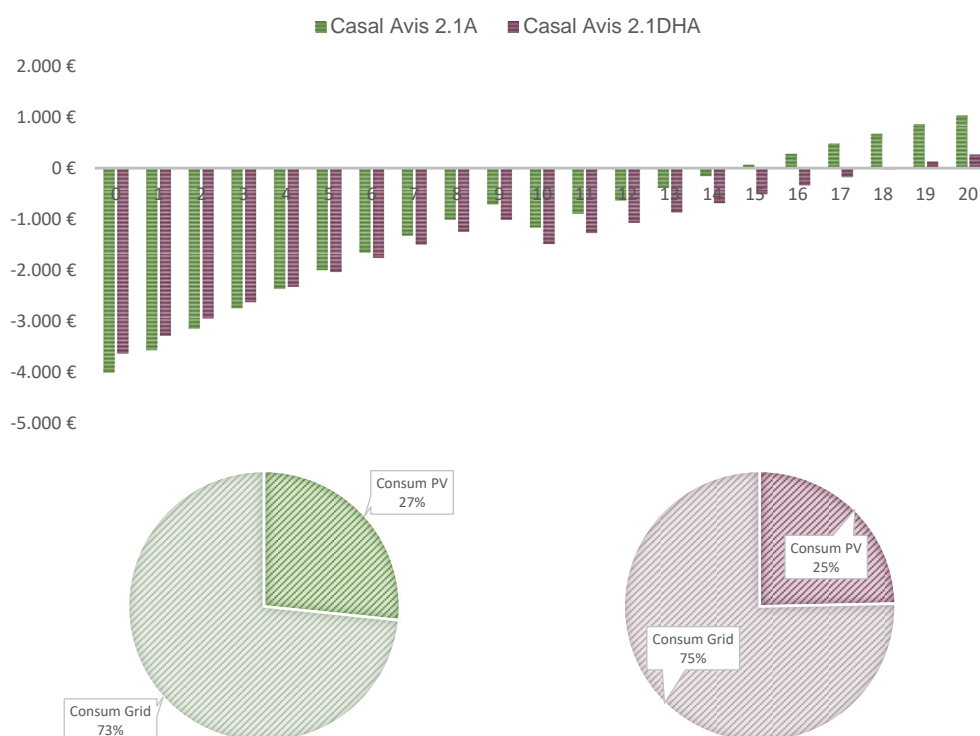


Figura A.2: Resultats model PV: Casal d'Avis



### A.3 Local Central

Els resultats obtinguts al Local Central estan representats a la taula [A.3](#).

Taula A.3: Resultats model PV: Local Central

Local Central 2.0	Tarifa 2.0A	Tarifa 2.0DHA
OBJ	-1.127	-1.210
Inversió [€]	1.336	1.282
Estalvi [€]	57	45
kWpic PV [kWpic]	0,4	0,3
Estalvi CO2 [kg]	149	136
VAN [€]	-1.141	-1.224
TIR	-8,8%	-11,3%
Payback [Anys]	-	-

No es recomana realitzar un projecte fotovoltaic al Local Central.

- $VAN \leq 0$
- $TIR \leq 5\%$
- Payback inexistent

El model desenvolupat en aquesta tesi no s'ajusta correctament a aquest equipament degut a que els convertidors estant caracteritzats a partir d'1kW de potencia. Aquest fet provoca que el cost del convertidor sigui més elevat que el preu actual de mercat. Observem a la *Figura A.3* que no es recupera la inversió inicial.

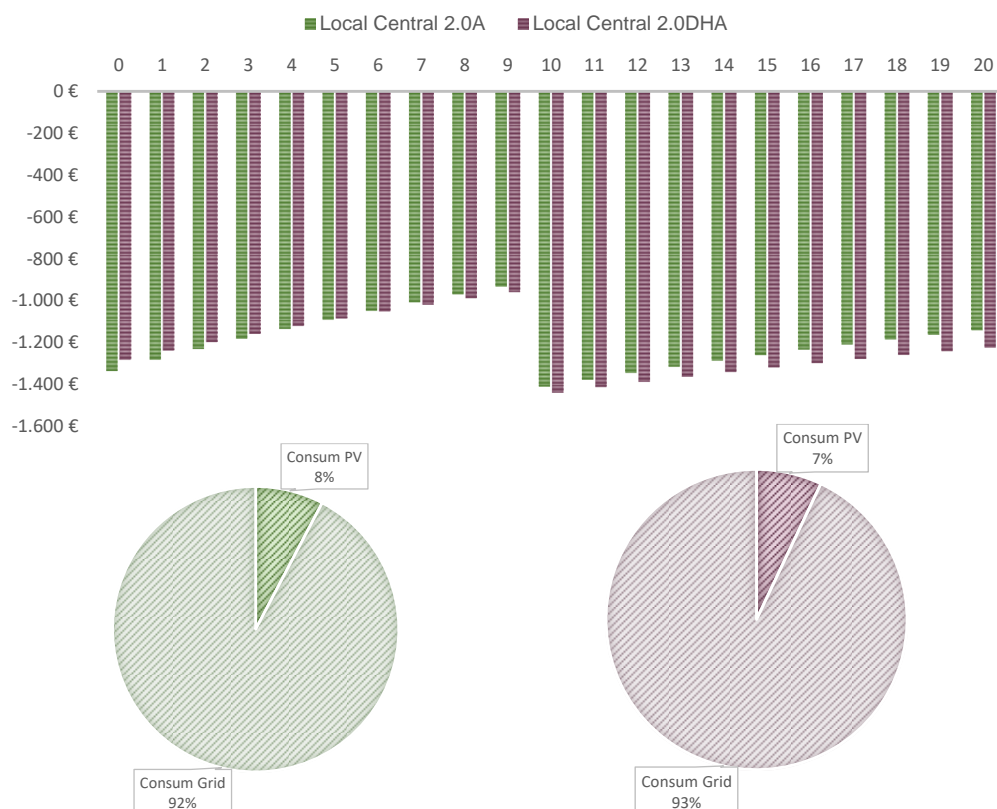


Figura A.3: Resultats model PV: Local Central

## A.4 Conclusions projecte fotovoltaica

Com s'ha comentat a la memòria aquest tipus d'instal·lacions són les més econòmiques, tot i així cal analitzar el consum abans d'iniciar un projecte d'aquestes característiques. Dels tres equipaments presentats únicament al Casal d'Avis es rendible instal·lar panells solars fotovoltaics



## Apèndix B

# Anàlisi de sensibilitat del cost de les bateries al Centre de Salut

S'ha realitzat un anàlisi de la inclusió de les bateries en la microxarxa del Centre de Salut en funció del cost d'aquestes. Es presenten 3 escenaris, la reducció del cost en un 30%, en un 50% i en un 60%. Cada escenari s'ha avaluat per tarifes amb i sense discriminació horària.

## B.1 Anàlisi per una Tarifa sense discriminació horària

A la taula [B.1](#) s'han recollit els resultats de les simulacions realitzades al Centre de Salut amb els escenaris ementats, és a dir, mantenint el cost de les bateries (100%) i reduint el cost de l'emmagatzematge a un 60%, un 50% i un 30% del preu de mercat durant la realització de la tesi.

Taula B.1: Anàlisi del cost de les bateries Centre Salut 2.1A

<b>Centre de Salut 2.1A</b>	<b>100%</b>	<b>60%</b>	<b>50%</b>	<b>30%</b>
OBJ	-914	722	1.005	1.766
Inversió [€]	11.740	10.542	10.258	14.097
Estalvi [€]	1.010	1.044	1.044	1.445
kWpic PV [kWpic]	5,4	5,4	5,4	7,4
NumEnair [kW]	0	0	0	0
NumNemo [kW]	0	0	0	0
SOCmax [kWh]	3.000	3.000	3.000	12.548
Estalvi CO2 [kg]	2.375	2.454	2.454	3.398
VAN [€]	-1.151	476	760	1.426
TIR	3,8%	5,5%	5,9%	6,2%
Payback [Anys]	-	-	-	-
i	5%	5%	5%	5%

A la *Figura B.1* s'observa l'evolució del cash flow acumulat al llarg dels 20 anys de projecte per les quatre situacions plantejades.

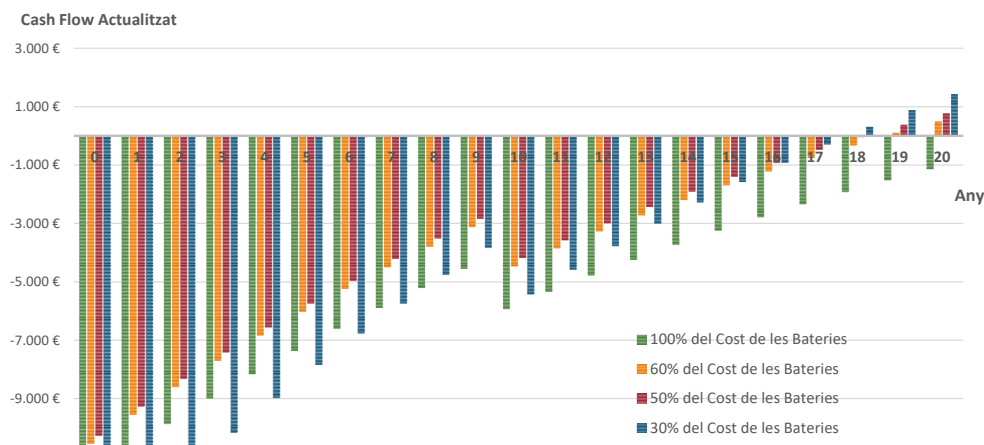


Figura B.1: Evolució Cash Flow acumulat: Anàlisi del cost de les bateries amb Tarifa 2.1A al Centre de Salut

## B.2 Anàlisi per una Tarifa sense discriminació horària

A la taula B.2 s'han recollit els resultats de les simulacions realitzades al Centre de Salut amb una tarifa amb discriminació horària. L'evolució en el cost de les bateries és la mateixa que en l'estudi anterior.

Taula B.2: Anàlisi del cost de les bateries Centre Salut 2.1DHA

Centre de Salut 2.1DHA	100%	60%	50%	30%
OBJ	-1.801	91	811	2.775
Inversió [€]	10.563	12.926	13.309	13.888
Estalvi [€]	830	1.186	1.279	1.492
kWpic PV [kWpic]	4,6	5,5	5,8	6,4
NumEnair [kW]	0	0	0	0
NumNemo [kW]	0	0	0	0
SOCmax [kWh]	3.000	9.526	11.794	19.688
Estalvi CO2 [kg]	2.063	2.604	2.737	3.013
VAN [€]	-2.008	-170	537	2.474
TIR	2,6%	4,8%	5,5%	7,1%
Payback [Anys]	-	-	-	-
i	5%	5%	5%	5%

A la Figura B.2 s'observa l'evolució del cash flow acumulat al llarg dels 20 anys de projecte per les quatre situacions plantejades

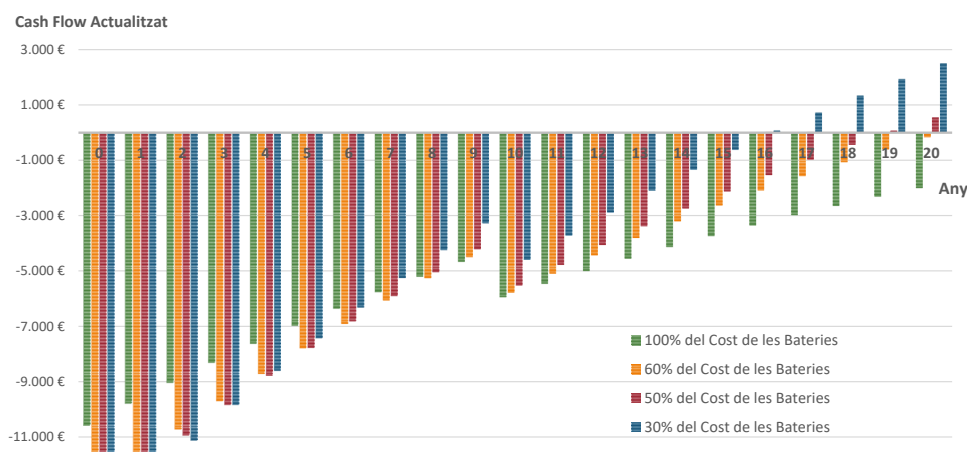


Figura B.2: Evolució Cash Flow acumulat: Anàlisi del cost de les bateries amb Tarifa 2.1DHA al Centre de Salut

### B.3 Conclusions de l'anàlisi

La reducció del cost de les bateries millora els resultats econòmics de la microxarxa. Amb la Tarifa 2.1A las inversiones són rendibles econòmicament quan la bateria redueix el seu cost per sota del 60%. Amb la tarifa 2.1DHA, en canvi, perquè la inversió sigui rendible econòmicament el preu de les bateries s'ha de reduir més d'un 50%.

Amb la tarifa sense discriminació horària la bateria només s'utilitza per emmagatzemar l'energia quan la generació supera la demanda, és per aquest motiu que, la capacitat de la bateria només supera el límit establert pel model (3.000 Wh) quan el preu d'aquesta és redueix un 70%. A la tarifa amb discriminació horària, per altra banda, la capacitat de la bateria òptima és de 9.500 Wh, 11.800 Wh i 19.700 Wh per als 3 escenaris estudiats.

En l'únic escenari en que la tarifa 2.1DHA presenta millors resultats que amb la tarifa 2.1A és amb una reducció en el cost de les bateries per sobre del 70%. En aquesta situació és més econòmic incrementar la capacitat de la bateria que la potència fotovoltaica.

Cal remarcar que en cap de les situacions estudiades els indicadors econòmics (VAN, TIR i payback) milloren els obtinguts en el model sense bateries, tot i així, no podem assegurar que amb una corba de consum diferent la situació sigui la inversa.

Per últim, cal remarcar que el model estudiat no té en compte la reducció de la potència que s'obté instal·lant emmagatzematge i que té un impacte molt important en la factura elèctrica.



## Apèndix C

# Pressupost

El pressupost d'aquesta tesi contabilitza la recerca i el desenvolupament del treball presentat, així com l'equipament d'oficina i els recursos informàtics utilitzats. Es considera que el projecte té una duració de 4 mesos i que el període d'amortització del maquinari i del programari és de quatre anys.

### C.1 Pressupost del maquinari

La taula C.1 mostra els costos del projecte en concepte de maquinari.

Taula C.1: Pressupost del maquinari

Concepte	Preu unitari	Unitats	Cost amortitzat
Ordinador portàtil HP ProBook	450 €	1	38 €
Monitor Benq de 17"	85 €	1	7 €
Total			45 €

### C.2 Pressupost del programari

La taula C.2 mostra els costos del projecte en concepte de programari.

Taula C.2: Pressupost del programari

Concepte	Preu unitari	Unitats	Cost amortitzat
MATLAB ®[29]	2.000 €	1	165 €
GAMS ®[30]	4.800 €	1	400 €
EXCEL	100 €	1	8 €
Total			573 €

### C.3 Pressupost de mà d'obra

La taula C.3 mostra els costos del projecte en concepte de mà d'obra.



Taula C.3: Pressupost de ma d'obra

Concepte	Preu/hora	Hores	Cost total
Hores de disseny i investigació	40 €	220	8.800 €
Hores de programació	40 €	150	6.000 €
Hores de redacció	40 €	150	6.000 €
Total		550	20.800 €

## C.4 Pressupost total del projecte

La taula C.4 mostra el pressupost total del projecte.

Taula C.4: Pressupost total del projecte

Concepte	Cost
Pressupost del maquinari	45 €
Pressupost del programari	573 €
Pressupost de mà d'obra	20.800 €
Total (sense IVA)	21.428 €
Total (amb IVA 21%)	25.920 €

El pressupost total per a la concepció, redacció i presentació de l'estudi ascendeix a 25.920 €. El pressupost té validesa d'un mes a partir de la data de la firma.

Data: 14 de Juny de 2018

Signatura: Miguel Bárcena González

## Apèndix D

# Impacte Ambiental

Les microxarxes representen un impacte positiu sobre el medi ambient. En general, permeten una reducció dels gasos contaminants degut a que faciliten la introducció de les energies renovables en el sistema elèctric i permeten reduir la generació convencional, que acostuma a ser més contaminant.

Els resultats obtinguts al cas d'estudi especifiquen que un panell fotovoltaic estalvia entre 100 kg i 150 kg de CO<sub>2</sub> l'any. Sent el CO<sub>2</sub> un dels principals gasos que generen l'efecte hivernacle.

Per altre banda, el sistema elèctric convencional transporta l'energia a través de línies d'alta tensió. Les infraestructures necessàries per transportar l'energia a més de ser perilloses, suposen un impacte important sobre els espais naturals on s'instal·len. En aquest sentit, les microxarxes solucionen aquesta problemàtica al incorporar-se a la xarxa de distribució i reduir el nombre de línies d'alta tensió necessàries.



# Bibliografia

- [1] Anthony J McMichael, Rosalie E Woodruff, and Simon Hales. Climate change and human health: present and future risks. *The Lancet*, 367(9513):859 – 869, 2006. [13](#)
- [2] Jonathan A. Patz, Diarmid Capmbell-Lendrum, Tracey Holloway, and Jonathan A. Floey. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(310), 2005. [13](#)
- [3] Comisión europea de la energía. ComunicaciÓn de la comisiÓn al parlamento europeo, al consejo, al comité econÓmico y social europeo y al comité de las regiones: Un marco estratégico en materia de clima y energía para el periodo 2020-2030. [13](#)
- [4] European Comission. Energy roadmap 2050. [13](#)
- [5] Huang Jiayi, Jiang Chuanwen, and Xu Rong. A review on distributed energy resources and microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9):2472 – 2483, 2008. [14](#)
- [6] Eduard Bullich-Massagué, Francisco Díaz-González, Mònica Aragüés-Peñalba, Francesc Girbau-Llistuella, Pol Olivella-Rosell, and Andreas Sumper. Microgrid clustering architectures. *Applied Energy*, 212:340 – 361, 2018. [14](#)
- [7] N. Hatziargyriou. *Microgrids: Architectures and Control*. Wiley - IEEE. Wiley, 2014. [17](#)
- [8] Thomas Ackermann, Göran Andersson, and Lennart Söder. Distributed generation: a definition in addition to this paper, a working paper entitled ‘distributed power generation in a deregulated market environment’ is available. the aim of this working paper is to start a discussion regarding different aspects of distributed generation. this working paper can be obtained from one of the authors, thomas ackermann.1. *Electric Power Systems Research*, 57(3):195 – 204, 2001. [17](#)
- [9] Priyanka Paliwal, N.P. Patidar, and R.K. Nema. Planning of grid integrated distributed generators: A review of technology, objectives and techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40:557 – 570, 2014. [17](#)
- [10] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D’haeseleer. Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy Policy*, 33(6):787 – 798, 2005. [17](#)
- [11] Renewables 2015. global status report. *REN21*, 2015. [18](#)
- [12] Enerdata. World consumption statistics. *Global Energy Statistical Yearbook 2017*, 2018. [18](#), [21](#)
- [13] Lazard. Lazard’s levelized cost of energy analysis. *LAZARD*, 2016. [19](#)

- [14] Antonio Cerrillo. Zapatero apaga la industria fotovoltaica. *La Vanguardia*, 2010. 20
- [15] Carlos Álvarez. 4.500 familias extremeñas que invirtieron en energía solar, encuentran dificultades para refinanciar los créditos. *eldiario.es*, 2016. 20
- [16] Lorena López and Rubén Esteller. El gobierno retira el plan para incentivar las renovables. *elEconomista*, 2010. 20
- [17] WindEurope. Financing wind energy beyond 2020. *WindEurope*, 2016. 21
- [18] WindEurope. Wind energy in europe: Outlook to 2020. *WindEurope*, 2017. 21
- [19] I. Atzeni, L. G. Ordóñez, G. Scutari, D. P. Palomar, and J. R. Fonollosa. Noncooperative and cooperative optimization of distributed energy generation and storage in the demand-side of the smart grid. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(10):2454–2472, May 2013. 22
- [20] I. Atzeni, L. G. Ordóñez, G. Scutari, D. P. Palomar, and J. R. Fonollosa. Demand-side management via distributed energy generation and storage optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(2):866–876, June 2013. 22
- [21] William F. Pickard, Amy Q. Shen, and Nicholas J. Hansing. Parking the power: Strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply–demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8):1934 – 1945, 2009. 22
- [22] Francisco Díaz-González, Andreas Sumper, Oriol Gomis-Bellmunt, and Roberto Villafáfila-Robles. A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4):2154 – 2171, 2012. 22, 33
- [23] Gomis-Bellmunt O. Egea-Alvarez A., Junyent-Ferré A. Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems. *Springer, Berlin, Heidelberg*, 2012. 23
- [24] Renu Sharma and Sonali Goel. Performance analysis of a 11.2 kwp roof top grid-connected pv system in eastern india. *Energy Reports*, 3:76 – 84, 2017. 34
- [25] B. Shiva Kumar and K. Sudhakar. Performance evaluation of 10 mw grid connected solar photovoltaic power plant in india. *Energy Reports*, 1:184 – 192, 2015. 34
- [26] Ran Fu, David Feldman, Robert Margolis, Mike Woodhouse, and Kristen Ardani. U.S. solar photovoltaic system cost benchmark: Q1 2017, *Tech. Report*, NREL, september 2017. 41
- [27] Alberto Moro and Laura Lonza. Electricity carbon intensity in european member states: Impacts on ghg emissions of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017. 41
- [28] B.Meindl and M.Templ. Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems. 45
- [29] Matlab pricing and licensing. <https://es.mathworks.com/pricing-licensing.html>. Accessed: 2018-06-02. 83
- [30] GAMS academic price list. <https://www.gams.com/fileadmin/academicp.pdf>. Accessed: 2018-06-02. 83